



TITLE:

構造物周辺局所地形の耐風工学的
影響に関する基礎的研究(
Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

長尾, 文明; 長尾, 文明

CITATION:

長尾, 文明 ...[et al]. 構造物周辺局所地形の耐風工学的影響に関する基礎的研究. 京都大学, 1989, 工学博士

ISSUE DATE:

1989-11-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r7006>

RIGHT:

構造物周辺局所地形の耐風工学的影響に
関する基礎的研究

平成元年 6 月

長 尾 文 明

正 誤 表

頁、行	誤	正
P. 20. 図2-1. 縦軸	L / δ	Z / δ
P. 134. 図7-25㉔. 注釈	$(\Psi=60^\circ, W/H=2, Z/H=1)$	$(\theta=60^\circ, W/H=2, Z/H=0.1)$
P. 177. 上から10行目	$(U(z) / U(z))$	$(U(z) / U_\infty(z))$
P. 192. 表9-1. 塔の バフエッティングに 及ぼすスケールの影響	○	△
P. 206. 表9-2. 表題	関門大橋	関門橋

構造物周辺局所地形の耐風工学的影響に 関する基礎的研究

平成元年 6 月

長 尾 文 明

まえがき

本研究は、構造物周辺の地形が構造物に及ぼす耐風工学的影響に関して調査・検討したものである。本研究の動機は、京都大学大学院在籍中に、台風による強風特性の調査を京都大学教授白石成人博士並びに京都大学助教授松本勝博士の指導の下に行なったこと、及び、徳島大学において、徳島大学教授宇都宮英彦博士の指導によって、大規模な切土工事の風況特性に及ぼす影響を縮尺地形模型を用いた風洞実験によって調査した結果、強風特性に及ぼす局所的及び比較的大規模な地形の影響の複雑さを痛感したことに端を発している。比較的单純な形状の地形に対しては、地形の及ぼす増速効果等に関する研究がなされているが、本研究においては、我国のような急峻且つ複雑な地形周辺の風況特性を精度よく予測し、構造物に及ぼす耐風工学的な影響を評価することを目的としている。

本研究の概要を以下に簡単に示す。

まず、第1章では、本研究の目的と従来の研究についてまとめている。

第2章においては、縮尺地形模型を用いた風洞実験において考慮すべき相似則について言及すると共に風洞実験概要及び実験に使用した境界層乱流特性をまとめて示している。

第3章は、重回帰分析によって日本各地の気象官署における風向別風速に及ぼす周辺地形特性の影響に関して検討を加え、風況を支配する地形因子を抽出している。

第4章においては、台風による強風特性に注目し、比較的大規模な地形特性並びに台風的位置・経路等の風向・風速に及ぼす影響について考察を加えている。

第5章では、気流の縮流等によって強風地域になることが知られている海峡部を対象として、風況特性に及ぼす周辺地形の影響について縮尺地形模型実験・現地強風観測等によって調査・検討している。

また、第6、7、8章においては、それぞれ、丘状地形、谷・切通し状地形、及び、半島状地形を対象とし、複雑な地形形状を簡略化した地形模型を使用した風洞実験により、風況特性と各地形因子の関係を明らかにするとともに、現地強風観測並びに縮尺地形模型実験によって、現象の確認と、縮尺地形模型実験の妥当性についても考察を加える。

そして、第9章では、本研究において調査・検討した局所地形の構造物の耐風安定性に及ぼす影響に関して考察を加えている。

最後に、第10章において、本研究で得られた知見と今後の検討課題をまとめている。

目 次

第1章 緒論	1
1-1 概説	1
1-2 従来の研究	3
1-3 本論文の目的と概要	12
第2章 風洞実験における相似則と境界層乱流特性	14
2-1 概説	14
2-2 風洞実験における相似則	14
2-3 本研究に使用した境界層乱流特性及び風洞実験概要	17
第3章 地形因子解析とそれに基づく風況特性	23
3-1 概説	23
3-2 地形因子及び解析手法	23
3-3 地形因子解析による地形と風況特性の対応関係	26
3-3-1 共通因子の最大風速に及ぼす影響	26
3-3-2 全国を対象とした場合の地形と風況特性の対応関係	29
3-3-3 地域別解析による地形と風況特性の対応関係	33
3-4 推定精度の悪い測点における強風特性と地形形状	36
3-5 結言	41
第4章 西日本各地の台風による強風特性	42
4-1 概説	42
4-2 台風期間中の強風特性	43
4-3 卓越風向と台風中心位置・経路の関係	48
4-4 各地点における強風時の台風中心位置と経路	50
4-5 結言	54
第5章 海峡周辺部における風況特性	55
5-1 概説	55
5-2 大鳴門橋周辺部の風況特性に及ぼす局所地形の影響	56
5-3 瀬戸大橋周辺部の風況特性に及ぼす局所地形の影響	63
5-3-1 周辺気象官署等における長期強風観測結果	63
5-3-2 児島・坂出ルート上における強風観測結果	68
5-3-3 縮尺地形模型実験による瀬戸大橋周辺部の風況特性	71
(a) 下津井瀬戸大橋周辺の強風特性	71
(b) 与島周辺部の強風特性	79
5-3-4 風洞実験の妥当性	87
5-4 結言	90
第6章 丘状地形における風況特性	91
6-1 概説	91

6-2	増速予測式 (ESDU) の概略	92
6-3	2次元丘状地形における風況特性	97
6-4	複雑な形状の丘における風況特性	102
6-5	結言	111
第7章	谷及び切通し状地形における風況特性	112
7-1	概説	112
7-2	単純化地形模型による谷及び切通し周辺部の風況特性	113
7-2-1	谷状地形における風況特性	113
7-2-2	切通し周辺部における風況特性	124
7-3	複雑な谷及び切通し状地形における風況特性	135
7-3-1	山間部の谷状地形における切通し周辺部の風況特性	135
7-3-2	複雑な切通し状地形における風況特性	143
	(a) 縮尺地形模型実験結果及び考察	146
	(b) 縮尺地形模型実験の妥当性 (現地観測による検証)	150
	I. 変動気流特性	150
	II. 切通し部道路面上の風向風速分布特性	152
	III. 平野部風向風速分布特性	153
7-4	地形模型を用いた風洞実験法に関する2、3の考察	158
7-4-1	模型のひずみが風況特性に及ぼす影響	158
7-4-2	上流側地形 (模型化範囲) の風況特性に及ぼす影響	165
7-4-3	境界層乱流特性及び実験風速の風況特性に及ぼす影響	170
7-5	結言	174
第8章	半島状地形における風況特性	175
8-1	概説	175
8-2	単純化半島状地形周辺の風況特性	177
8-3	複雑な半島状地形における風況特性	185
8-4	結言	190
第9章	構造物周辺地形の構造物に及ぼす耐風工学的影響評価	191
9-1	概説	191
9-2	小地形の構造物に及ぼす耐風工学的影響評価	191
9-3	構造物本体の風況特性に及ぼす影響	211
9-3-1	橋床周辺部における増速効果	211
9-3-2	主塔周辺部における増速効果	212
9-4	結言	219
第10章	結論	220
	謝辞	224
	参考文献	225

第1章 緒論

1-1 概説

近年、構造物の長大化・高層化にともない構造物に作用する風荷重の算定が重要な問題となっている。特に、我国は、台風の常襲地帯に位置しており、強風による災害も古くから多く発生している。構造物を安全に且つ経済的に建設するためには、構造物建設地点に作用する風況特性を精度よく捉え、静的並びに動的な構造物の耐風性を検討する必要がある。構造物の耐風設計法については、世界各国において長期の研究成果・経験を踏まえて定められている。我国においても、土木構造物、建築物、送電線等の各構造物に対して、構造物に作用する荷重、使用条件などを反映させ、個々の構造物に耐風設計基準が作成されている。

土木構造物において、風の作用が特に重要な構造物は橋梁であり、橋梁に対する耐風設計の流れ並びに風荷重の評価法について簡単に説明を加える。

図1-1は、松本¹⁻¹⁾によってまとめられた橋梁の耐風設計の流れである。構造物の規模によって2つの流れに大別される。すなわち、規模の小さい橋梁（道路橋では、支間長が200m以下、鉄道橋では150m以下）に対しては、道路橋設計示方書並びに鉄道橋設計標準によって全国一律の基準風圧（無載荷時： 300kg/m^2 、活荷重載荷時： 150kg/m^2 ）を作用させることが決められている（図中、最下段の流れ）。一方、規模の大きな橋梁、特に可撓性に富む橋梁等については、橋梁個々に検討され（上段の流れ）、風荷重算定のためには、①架橋地点における風速の評価、②構造断面の静的空気力係数の評価、③風の乱れに起因する不規則振動（パフェッティング）による応力を風荷重の割り増しとして考慮する。さらに、④空力不安定振動（渦励振、ギャロッピング、ねじれフラッタ、連成フラッタ）の有無、部材の疲労、使用性について検討する必要がある。このような耐風設計の流れにおいて設計基本風速の評価が最も重要となる。ところが、自然風は、その発生機構・周辺地形等により、その特性が複雑に変化することが知られており、構造物建設地点の風況特性は、簡単には推定できない。一般に、設計基本風速は、構造物の耐用年数に対する風速の再現期待値より決定されており、再現期待風速値は、構造物建設地点における長期風観測が不可能な場合には、地形因子を用いた重回帰式による統計的推定手法が用いられ、建設地点における数箇年の風観測記録が得られる場合には、気象官署等の基準観測値と建設地点における観測値の相関を用いて求められている。しかし、我国の地

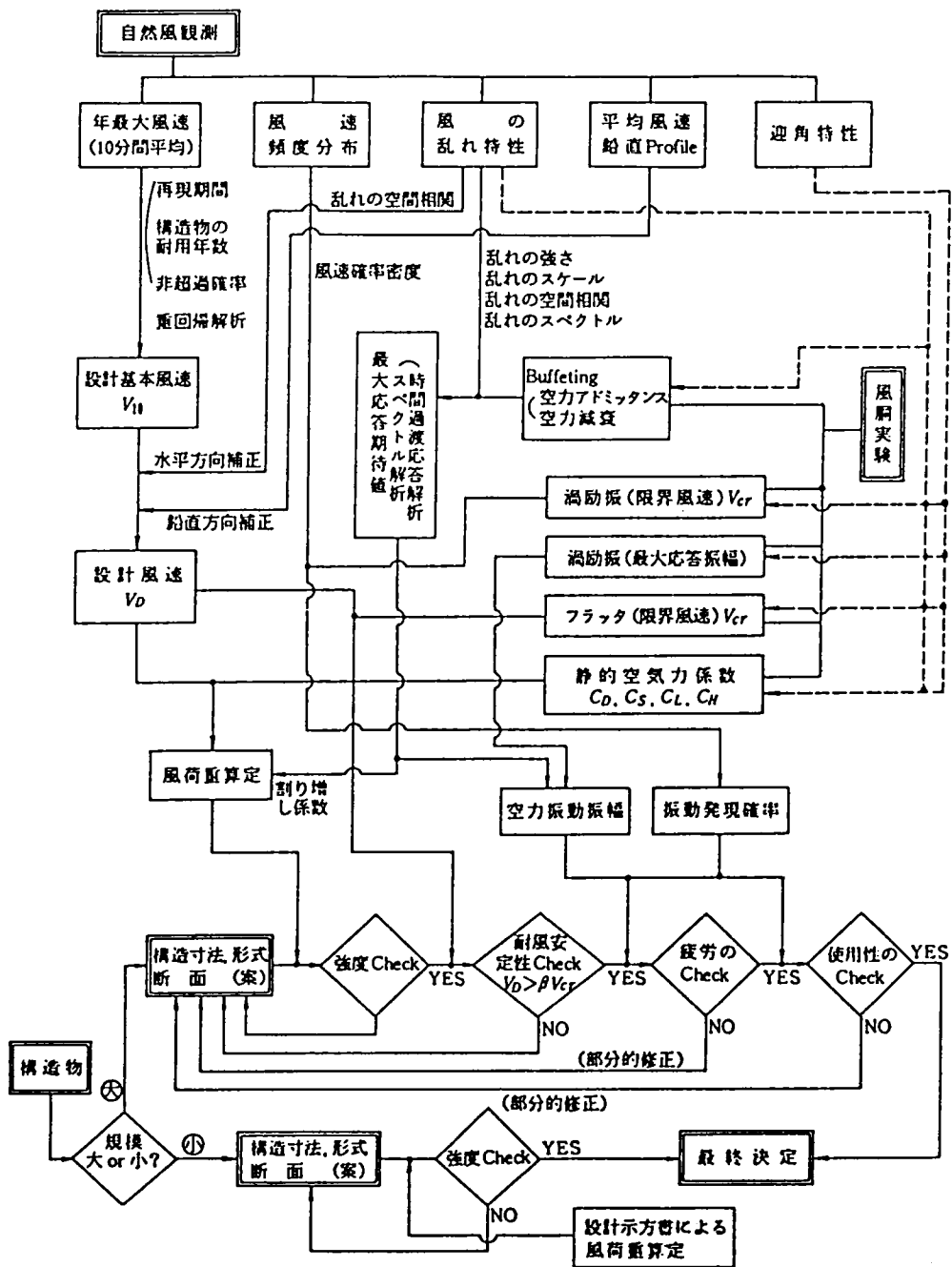


図 1 - 1 耐風設計の流れ (橋梁) ¹⁻¹⁾

形は、急峻且つ複雑であり、構造物周辺の地形特性により、推定値と大幅に異なる風が作用することも考えられる。また、おろし風・だし風等比較的狭い範囲に強風が作用する局地風の発生する特異な地形も存在しており、地形特性と風況特性の一般的な対応関係は未だ不明瞭な点が多く残されている。

そこで、本論文では、日本各地に存在する代表的な地形形状をモデル化し、風洞実験によって風況特性を支配する地形因子を抽出し、地形因子の風速に及ぼす増速効果について検討を加え、設計基本風速及び設計風速のより合理的な推定の一助を成すとともに構造物周辺地形の構造物の耐風安定性に及ぼす影響を明らかにしようとするものである。さらに、橋梁等の構造物の耐風安定性には、風速値とその作用する方向（風向）が特に重要な要素となることを考慮して、地形特性が風向別に求めた基本風速値（最大風速・平均風速等）に及ぼす影響を調査するとともに、我国は台風の常襲地域であり年最大風速は台風に起因する強風が多いことより、地形特性と台風による強風特性についても検討を加える。

また、風況特性に大きな影響を及ぼすことが知られている大気の安定度については、本研究においては、主として強風特性に注目すること並びに比較的局所的な風況特性に注目すること等より、中立安定時に限定している。

以下、本章では、従来の研究を整理し、本研究の概要を述べることによって、本論文の位置づけを明らかにしようとするものである。

1-2 従来の研究

地形特性の風況特性に及ぼす影響に関する調査・研究は、一般に次に示す4種類の方法が考えられる。

- ①現地強風観測
- ②縮尺地形模型を用いた風洞実験
- ③数値解析による流れのシミュレーション（数値風洞）
- ④地形因子による統計解析

①の現地強風観測は特定地域の風況調査に対し、最も確実な方法と考えられる。しかし、観測点の数や測定位置・高度に制限を受け、観測の機会、すなわち強風が作用する機会も限られることより、比較的長期間に渡って調査を続ける必要があり、経済面も含め多

くの困難が伴ない、現地観測のみによって現地の強風特性を予測することが不十分となることもある。そこで、②に示した縮尺地形模型を用いた風洞実験が従来より使用されてきた。しかし、風洞実験は、気象条件を単純なモデルに置換した状態と考えられ、風洞内に自然風を模擬する方法も多数考案されているが、未だ確立されていない。また、実験に使用される縮尺模型は、注目する地域のみならず周辺の地形もかなり広範囲に渡って相似させる必要もあり、風洞の大きさによる制約のため模型縮尺が小さくなり（1/500 ～ 1/10,000）、測定精度が問題となる。さらに、模型化範囲、地表粗度及び温度成層等の取扱いに問題が残されている。③の数値風洞は、数値解法により流れの解析を行なうものであり、コンピュータ技術の発達に伴って最近盛んに研究されている。しかし、理論式を取扱い上の制約も存在し、複雑多岐な地物周辺の流れに適用するまでは至っていない。この数値風洞は、限られた領域において風洞実験・現地観測の補足的な役割を果たしているが、将来、研究の進歩に伴ってこの問題の解決手法の主流となる可能性もある。また、④の地形因子による強風の統計解析は、既存の観測点の強風特性を周辺地形特性によって統計的に対応関係を抽出し、任意地点に作用する強風を推定しようとするものであり、比較的地形特性が穏やかな場合には有効である。しかし、我国のように複雑且つ急峻な地形特性を示し、さらに、作用する強風が主として台風に依存すること等により局所的な任意地点の風況の推定には問題が残されている。

これらの各研究手法を用いた局所風況の推定に関する従来の研究について以下に簡単に示す。風況特性に影響を及ぼす局所地形として、丘（孤立・連立、2次元・3次元、尾根、盛土、崖、絶壁等を含む。）、谷（溪谷、河口等）、海峡、切土（峠）、半島等が挙げられる。まず、地形が比較的簡単で、研究例の多い丘状地形について示す。

丘によって大気境界層内の流れは大幅に変化し、構造物に作用する風荷重、風力エネルギー、大気汚染、航空機の飛行、さらには農作物等に及ぼす影響が大きいことが知られており、Hunt¹⁻²⁾によって簡潔にまとめられている。

中立安定時の勾配の緩やかな2次元丘頂上部の増速値 Δu は、ポテンシャル流れを想定すると次式より得られる。¹⁻³⁾

$$\Delta u = H/L_0 \cdot U_0 \cdot \sigma(x, y) \quad (1-1)$$

ここに、 H ：丘の高さ、 L_0 ：丘の水平代表長、 U_0 ：接近流速、 σ ：丘の形状に依存する形状関数（ $O(1)$ ）である。

Jackson & Hunt¹⁻⁴⁾は、大気境界層内に位置する緩やかな丘に対して、準理論的に、増

速率 ΔS (fractional speed-up ratio)が以下になることを示した。

$$\Delta S_{\max} = 2H/L_1 \cdot \sigma_{\max} \quad (1-2)$$

$$\Delta S(x, \Delta z) = \Delta u(x, \Delta z)/U_0(\Delta z) \quad (1-3)$$

$$U(x, \Delta z) = U_0(\Delta z) + \Delta u(x, \Delta z) = U_0(\Delta z) \cdot (1 + \Delta S(x, \Delta z)) \quad (1-4)$$

ここに、 L_1 ：丘頂上部から斜面の高さが $H/2$ となる地点までの水平距離、 Δu ：丘によって増速された風速、 Δz ：地表面からの高さであり、増速率として同一高さの接近風速によって基準化された定義 (speed-up factor) 式 (1-5) も使用されるが、式 (1-3) の定義による増速率が Δz 並びに丘の勾配に対して穏やかに変化し、より一般的な表記であることが示されている。

$$S(x, z) = U(x, z)/U_0(z) = (U_0(x, \Delta z) + \Delta u(x, \Delta z))/U_0(H + \Delta z) \quad (1-5)$$

また、Jackson & Huntの研究では、図 1-2 に示されるように丘の影響を大きく受ける内部領域と比較的影響の少ない外部領域に流れを区分して考慮しているが、この現象は、Bradley¹⁻⁵⁾ による丘上の風速の鉛直分布の実測によって確認されている。

Bowen¹⁻⁶⁾ も比較的勾配のなだらかなベル形丘、三角形丘、斜面を用いた風洞実験によって、Jackson & Huntの推定式が実験値と良い対応を示すことを確認している。

一方、勾配の急な斜面に対しては、Bowen & Lindley¹⁻⁷⁾ が、実験的研究を行っており、斜面の勾配が急になると丘頂上部で剥離が生じ、増速率 ΔS には上限値があること、また、 $H/L_1 = 1/4 \sim 1$ の傾斜では ΔS は約 0.5 の一定値になり、Jackson & Huntの推定式は不適であることが指摘されている。また、Pearse, Lindley, & Stevenson¹⁻⁸⁾ は、ベル形丘、三角形丘を対象として、法面勾配、表面粗度、接近流の鉛直プロファイルを変化させた実験を行なっている。そして、滑らかな三角形丘の増速率は、急勾配より中間の勾配 ($H/L = 0.3, 0.5$) において大きくなること、また形状の変化は流線の剥離点に影響を及ぼし、表面粗度は勾配の緩い丘 ($H/L = 0.1$) の増速率を減少させ、乱れの大きな接近流中 ($\alpha = 0.29$) では、増速率が大きくなることを報告している。

藤本、大熊ら¹⁻⁹⁾ も崖・傾斜地に対して同様な実験を行ない類似した結果を得ている。

丘の表面粗度に関しては、Britter, Hunt, & Richards¹⁻¹⁰⁾ が風洞実験によって、滑らかな表面を粗くすると剥離が早まり、逆に粗い表面を滑らかにすると剥離が遅れることを報告している。数値解析による丘状地形の研究例としては、Alexander & Coles¹⁻¹¹⁾、Taylor¹⁻¹²⁾ の研究が挙げられる。Alexander & Coles は、丘の上空 4H まで丘の影響が残ること、丘の地表面付近で風速の増加が大きいこと等、実測結果及び実験結果と類似

した結果を示し、Taylor¹⁻¹³⁾ は、非直交座標系を用いることにより、任意形状の丘に作用する流れを解析している。最近では、計算機の大規模化、高速化に伴って、 $k-\epsilon$ モデル等の乱流モデルを対象とした解析がYeung & Kot¹⁻¹⁴⁾、Bergeles¹⁻¹⁵⁾ らによって行なわれ、計算機の発達とともに解析精度の向上が期待できるものと思われる。

3次元の丘については、ポテンシャル流れを想定すると長円形丘（主流方向2L、主流直角方向2b、高さH）では、以下のような増速率となる。¹⁻³⁾

$$\begin{aligned} H/L=0.1, \quad S=1.055 \sim 1.062 \\ H/L=0.33, \quad S=1.21 \sim 1.3 \end{aligned} \quad (1-6)$$

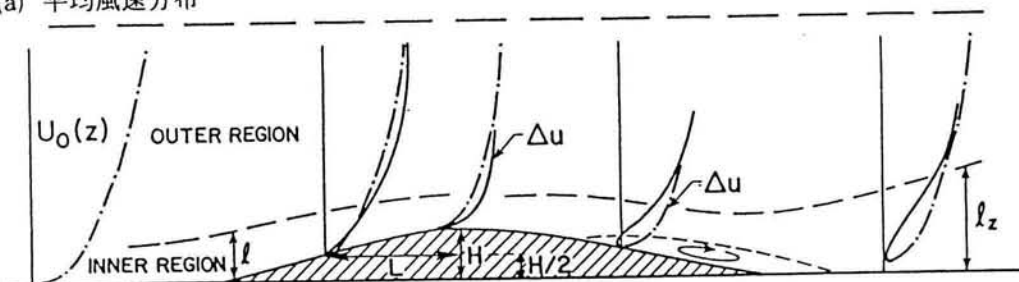
また、Mason & Sykes¹⁻¹⁶⁾ は、ほぼ円形状の丘であるBrent Knoll hill (H=130m、最大勾配0.25、L=300m、 $z_0=0.02m$) において実測を行ない、Jackson & Huntの推定式を3次元的に応用した値と計測された増速率が良く一致することを報告している。

Teunissen ら^{1-17), 1-19)} も3次元孤立丘上の流れの特性を正しく把握し、数値シミュレーション・風洞実験の精度を評価する目的で、Kettle hill (H=102m, x=1km, y=2km) 及び Askervein hill (H=116m, x=1km, y=2km) を対象とした現地観測を実施している。風洞実験に使用した模型の縮尺は、1/800 ~ 1/2500 であり、地表の僅かな起伏に起因した増速率の変化特性が実験・数値解析によっても再現され、両者に良い対応関係が得られている。風向によっては、数値シミュレーション、風洞実験、及び、Jackson & Huntの推定式による増速率が実測値より大きくなること、丘の下流域において、間欠的な剥離に伴って風速が低下する現象が観測されているが、数値解析では過大評価になるなどの問題点が指摘されている。

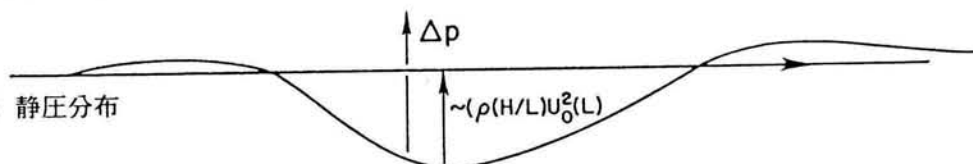
連立した2次元丘上の流れは、Verma & Cermak¹⁻²⁰⁾、Counihan¹⁻²¹⁾ が実験を行っており、最上流側の丘では、後列の丘がないときとほぼ同様な流れとなり、2列目以後の丘は、最上流側の丘の後流に位置するようになり、風速は小さく、乱れが大きくなる。丘の頂上間の距離が短い場合には ($B/H=3, 6$)、頂上を地表と仮想したような風速分布となることが報告されており、特に、勾配の急な丘が谷の広さ5H以下で連なるときには、谷において循環流が形成されることも示されている。

以上の研究成果等を参照して、丘状地形の風速に及ぼす影響を設計風速に取り込むことが、ESDU¹⁻²²⁾、Cook¹⁻²³⁾、Lemelin, Surry, & Davenport¹⁻²⁴⁾ らによって提案されている。平坦な地形における影響は、Deaves & Harris¹⁻²⁵⁾、Deaves¹⁻²⁶⁾ の考えに従って地表粗度とその吹走距離を考慮することによって定まり、さらに、標高、高度、並びに地

(a) 平均風速分布



(b) 静圧分布



(c) 変動風速分布

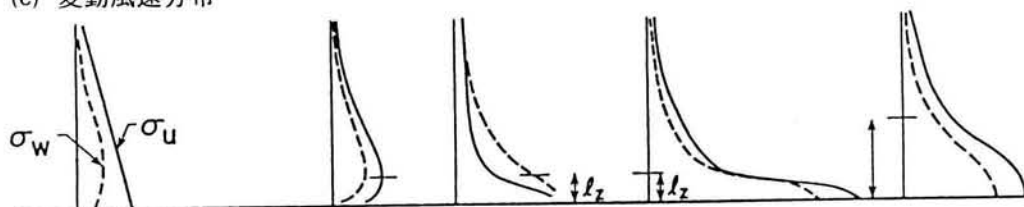


図 1-2 ならかな 2 次元丘周辺の風況特性 (大気は中立安定) ¹⁻²⁾

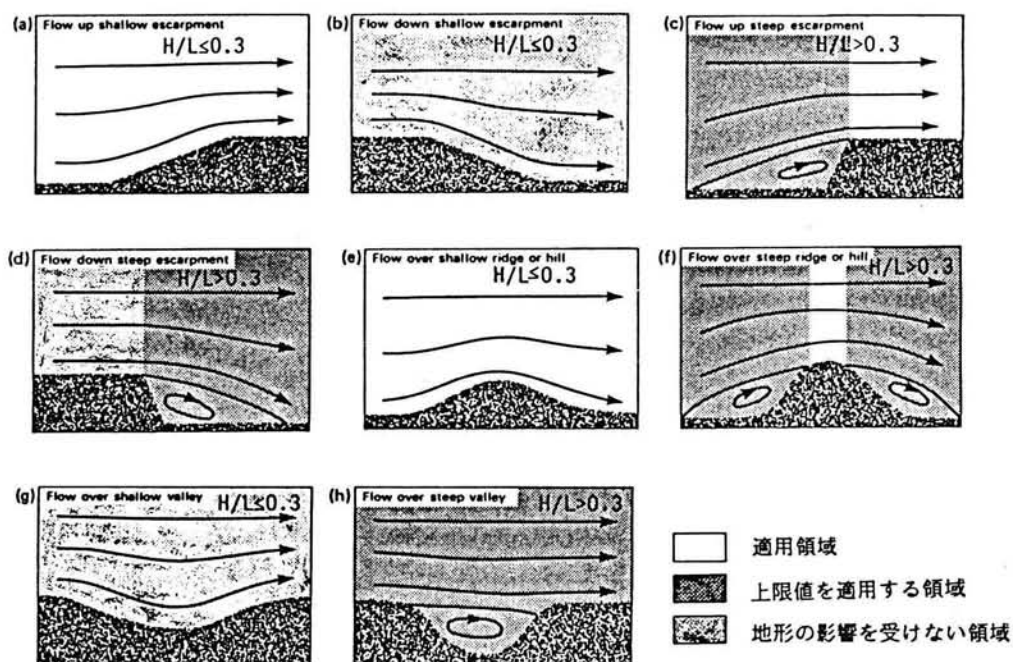


図 1-3 提案式の適用領域 ¹⁻²³⁾

形補正等を行なうことを提案している。ただし、考慮される丘状地形は、図1-3¹⁻²³⁾に示されるように、法面勾配が比較的なだらかな傾斜に限られ、剥離を伴う急勾配については上限値を使用すること及び複雑な地形に対しては風洞実験または数値解析による検証等が必要であり、地形の及ぼす影響をより詳細に検討する必要性が示されている。これらの指針の有効性については、Baker, Wood, Gawthorpe¹⁻²⁷⁾、Baker¹⁻²⁸⁾・¹⁻²⁹⁾らが盛土とその周辺部の現地風速測定及び風洞実験を行ない、地物（特に樹木、並木）の模型化手法、風洞実験の妥当性の検討と併せて、丘、盛土、谷などにおける増速率を調査し、ESDUの推定値と良い対応を示すことが確認されている。そして、盛土に水平偏角を有する風が作用するときには、盛土と直交する成分の風速を考慮することによって、増速率が推定できることを指摘している。

さらに、大気汚染の問題に関連して、中立時及び安定時における丘（2次元丘、傾斜地・3次元丘等）の拡散に及ぼす効果について、Thompson & Snyder¹⁻³⁰⁾は、風洞実験（中立時）並びに水槽実験（安定時）による調査を行なっている。拡散現象を取扱う場合には大気の安定度が大きな問題となり、数多くの研究が続けられている。¹⁻³¹⁾・¹⁻³²⁾ また大気の安定度は、おろし等でよく知られる局地風の発生条件にも密接な関係があり、世界各国で多数の研究が成されている。¹⁻³³⁾ - ¹⁻³⁵⁾

我国においても、気象関係者を中心として各局地風の事例研究（日高しも風¹⁻³⁶⁾、羅臼だし風¹⁻³⁷⁾、寿都だし風¹⁻³⁸⁾、清川ダシ¹⁻³⁹⁾、松本の南風¹⁻⁴⁰⁾、伊吹山周辺のおろし風¹⁻⁴¹⁾、岡山県の広戸風¹⁻⁴²⁾、愛媛県をやまじ風¹⁻⁴³⁾・肱川あらし¹⁻⁴⁴⁾等）及び、関東と中部両地方と周辺域を含めた中部日本全域における強風特性を調査した河村の研究¹⁻⁴⁵⁾、さらに、山越え気流に関する理論的・数値解析的研究¹⁻⁴⁶⁾・¹⁻⁴⁷⁾等が行なわれている。また、相馬¹⁻⁴⁸⁾は、やまじ風の発生状況（弱い北風→非常に強い南風（やまじ風）→弱い北風）を考慮して、気流の乱れの強さが大きくなると山頂部からの剥離が抑制され、その結果おろし風が発生すると考え、風洞実験で検証している。

丘状地形のみならず、海峡、谷状地形及び半島状地形等の小地形においても風速が増加することが知られており、塩谷¹⁻⁴⁹⁾は、各種小地形を対象とした風洞実験及び現地観測調査結果を簡潔にまとめている。また、長大橋梁等の建設に先立って、海峡等に作用する強風特性の調査も数多く行なわれている。鳴門海峡を対象とした調査が光田ら¹⁻⁵⁰⁾・¹⁻⁵¹⁾によって実施され、風洞実験によると、海峡中央部より左右の岬付近で風速の増加率が大きくなること、模型縮尺が1/2000～1/12000と小さいことより現地観測を行なった

地上6mの高さの風速値の分布とは誤差が大きくなること、岬上の風速は、風速レベルが大きくなると大気の安定度に依存せず高度40m以上ではほぼ一様な値となること、及び、水平縮尺と鉛直縮尺がそれぞれ1/12000、1/4000のひずみ模型では地物の影響が若干過大評価となること等が報告されている。また、藤谷ら¹⁻⁵²⁾は、来島海峡・多々羅海峡における現地観測及び縮尺地形模型実験を行ない、海峡の上流側に位置する島の影響等を調査し、島の存在によって風速が低下する領域（島の幅の2倍以上離れた風下に及び、その影響高さが、島の標高の2倍以上になる。）を明らかにするとともに、作用する風向によって海峡上の強風域が変化し、海峡上における増速率は10%程度と報告している。さらに、本州四国連絡橋公団は、児島・坂出ルートにおける長期風観測¹⁻⁵³⁾、冬期におけるルート上の橋梁における風観測¹⁻⁵⁴⁾も行なっている。これらの結果は、第5章において、宇都宮・長尾らによる同ルート周辺の風洞実験結果¹⁻⁵⁵⁾及び、鳴門海峡周辺部における現地強風結果¹⁻⁵⁶⁾と併せてまとめられている。V字谷並びに半島状地形における増速効果については、相馬¹⁻⁵⁷⁾・¹⁻⁵⁸⁾によって、自動車の横転事故例の調査に関連して報告されており、周辺部の風速の2倍程度の強風が作用することもあると示されている。

また、切土による風速の増加現象は、宇都宮、長尾ら¹⁻⁵⁹⁾・¹⁻⁶¹⁾の縮尺地形模型及び単純化地形模型を用いた実験的研究によって調査されている。さらに、宇都宮、長尾ら¹⁻⁶²⁾は、半島状地形における増速効果に関しても単純化模型を用いた実験によって調査している。また、Cook, Coulson, McKay¹⁻⁶³⁾は、ジブラルタル空港周辺（急斜面の半島状地形、Rock）における縮尺地形模型実験とパイロットへのアンケート調査等によって、特定の風向（尾根の軸と10～50度偏った風向）においては、尾根の下流側に、回転渦が形成され、強風が作用することを明らかにしている。

これらの縮尺地形模型実験における気流の相似性については、次節で検討するが、模型化範囲、模型化精度、縮尺等に関しては、Neal¹⁻⁶⁴⁾、Neal, Stevenson, & Lindley¹⁻⁶⁵⁾が、比較的複雑な丘状地形を対象として風洞実験と現地観測結果の比較に基づいて検討を加えている。その結果、丘状地形を台形で近似することは問題があり、林、並木等の樹木も再現する必要があるが、模型精度が良ければ、縮尺は特に問題とならず（縮尺1/4000と1/8000の比較結果）、ある注目部分を取り出した場合にも全体模型とほぼ同じ結果が得られることより、地形特性によっては分割模型を用いて結果を合成することも可能であると報告されている。しかし、少し地形が複雑になると分割模型による実験結果の推定精度には問題があるものと考えられる。そして、前述の光田らによる実験結果¹⁻⁵¹⁾から、

地物周辺の測定高さの低い測点の風速値を精度よく推定するためには、縮尺の大きな模型が必要であると判断され、目的に適応した縮尺を選定する具体的指標は未だ解決されていないと考えられる。また、模型の閉塞率についても検討されており、境界層厚さが十分大きければ、7%程度の閉塞率は問題ないと指摘されている。

また、市街地における高層建築物周辺の風は、ビル風としてよく知られており、現地観測、模型実験等が盛んに行なわれており、風洞実験法（模型の精度、模型化範囲等）についても我国の研究グループによって調査されており¹⁻⁶⁶⁾、地形模型を用いた風洞実験に対しても参考になる。得られた結果を簡単に要約すると、模型の縮尺は、閉塞率、乱れのスケール、風洞内の静圧勾配等を考慮して決定する必要があるが、閉塞率5.7%以下ではほとんど問題がないことが確認されている。また、建築物の表面粗度の影響も調査されているが、明確な結論は得られず、さらに検討の余地が残されている。一般の地形模型と同様に、樹木の及ぼす影響が大きいことが確認されているが、模型化手法までは確定できていない。また、市街地の先端から新たな境界層（内部境界層）が発達し、この境界層が十分厚く発達した地点では気流の相似性が良いことが示されており、この内部境界層が十分発達するのに必要な模型化範囲は、測定点周辺の市街地高さの10~25倍程度以上、且つ測定高さの20倍程度以上に渡って模型化することが必要であり、この範囲内に、広い空地や、内部境界層より高い建築物が存在する場合にはさらに広い範囲を模型化する必要がある。この上流側の市街地の模型化に際しては、市街地の平均建築面積、平均高さを一致させた直方体群で置換することが可能な場合もあることが示されている。また、風上の大規模構造物の影響は大きく注意が必要となることも指摘されている。

以上、簡単に局所的な地形特性が風況特性に及ぼす実験的、解析的研究の概要を示したが、前述の地形因子を用いて統計的に風況を予測する研究を以下に紹介する。

我国においても斎藤ら¹⁻⁶⁷⁾が、共軸図法という地形因子毎に風速に対する影響度の経験曲線を描く図式法により風速の推定を行なった。この方法は、既観測点及び観測資料が少ない場合には、経験曲線を描くことが不可能であり、また、作図の際の曲線の決定方法にも客観性を欠く欠点がある。そこで、共軸図法に代り電子計算機によって地形因子と風速データ間の多重回帰式を作成し、未観測点の地形因子を代入することによって風速値を推定する手法が発達した。石原、山岸¹⁻⁶⁸⁾は、関東、中部、東北地方の気象官署の50年再現期待風速を推定し、土木研究所、気象協会¹⁻⁶⁹⁾は、日本全国の任意地点における再現期待風速値を算出し風速分布図を作成している。成田¹⁻⁷⁰⁾は、橋梁の設計

風速の設定に関連して、全国の気象官署の再現期待風速を解析している。村上ら¹⁻⁷¹⁾は、AMeDASの風速データを使用して青森、秋田、山形を解析対象として月、年、季節毎の平均風速をコンピュータを利用して作成した地形因子を用いて推定しており、注目される。近年、白石、松本ら^{1-72), 1-73)}は、我国における強風は、主として台風起因していることに注目し、従来の地形因子に台風の来襲頻度を加えた解析を行ない推定精度の向上を計るとともに、風向毎に通常風特性と台風特性を反映させた解析を行ない、風向別に強風期待値の推定を行なっている。宮田ら¹⁻⁷⁴⁾も、風向別に平均風速、再現期待風速を円形及び扇型の領域の地形因子を用いて推定し、考慮する半径によって推定精度が変化し、風速を支配する地形特性はかなり広範囲に渡っていることを示した。また小泉、羽倉^{1-75), 1-76)}は、比較的小領域な地点に注目（八丈島、千葉県）し、大規模地形から微地形まで総合した主成分解析を行ない、台風による強風災害と風力分布の対応関係を調査し、推定された風速分布と災害の大きさがよく対応することが示されている。

1-3 本論文の目的と概要

前節に示したように、局所地形の風況特性に及ぼす影響は、構造物の設計、風力エネルギーの利用、走行車輛の安全性、大気汚染問題、農作物及び人々の生活環境等非常に広範に渡ることが明らかであるが、特に重要な構造物建設地点等を除くと、比較的単純な勾配の緩やかな丘状地形が周辺部の風況特性に及ぼす影響がほぼ明らかになっているに過ぎない。我国のように、地形が複雑且つ急峻な地域に対しては、代表的な地形を単純にモデル化することによって、風況を支配する局所地形因子を抽出し、設計風速並びに構造物の耐風性に及ぼす耐風工学的影響等の基礎資料とすることが必要であると判断できる。

そこで、本研究では、このような観点に基づき、複雑な地形を単純化した簡略化地形模型を使用し、風況特性を支配する代表的な地形因子を抽出し、局所地形の増速効果について検討を加え、局所地形の構造物の耐風安定性に及ぼす影響を明らかにしようとするものであり、以下に各章の内容を簡単に列挙する。

まず、第2章では、地形模型実験を行なうに当たり、考慮すべき相似条件について検討し、本研究において使用した乱流境界層特性をまとめて示す。また、本研究で実施した風洞実験の概要も併せて示す。

第3章においては、日本各地の気象官署における24年間の風速データを用い、橋梁等の耐風性に大きな影響を及ぼす風向を考慮した重回帰分析を行ない、特異な風の作用する地点を抽出し、その風況特性を支配している地形因子について考察を加える。

また、第4章では、我国の強風が主として台風に起因することを考慮し、台風の経路・位置と西日本各地の気象官署における風向風速特性の関係について調査し、比較的スケールの大きな地形特性の風況特性に及ぼす影響に関して調査するものである。

第5章においては、長大橋梁が建設されている海峡部における風況特性を、縮尺地形模型実験及び現地強風観測調査によって検討することにより、周辺局所地形の風況特性に及ぼす影響を明らかにする。

第6章においては、過去によく研究されている丘状地形について、我国のように地形が急峻な場合の増速効果に注目し、単純化地形模型実験によって増速評価式を提案し、縮尺地形模型実験結果と比較検討する。

次いで、第7章では、丘状地形を若干複雑な形状とした2つの尾根の間に切通しが存在する地形及び谷状地形を対象とし、切通し及び谷に平行な風が作用するときの風況特性を支配する地形因子を抽出するとともに、縮尺地形模型実験の妥当性についても、現地強風

観測結果と比較検討することにより若干の議論を行なう。

また、第8章では、第7章において注目した切通し状地形の片側で表現できる半島状地形に着目し、半島背後に作用する強風（接近流速の2倍）の発生原因の究明並びに地形因子の及ぼす影響について詳細に調査するとともに、縮尺地形模型実験、現地観測によって現象を再確認する。

そして、第9章において、本論文で調査・検討した局所地形が構造物の耐風安定性に及ぼす影響の評価法について言及し、具体的な構造物を対象として考察を加える。

最後に、第10章において、本研究で得られた知見と今後の検討課題をまとめている。

第2章 風洞実験における相似則と境界層乱流特性

2-1 概説

前章の従来の研究に示したように地形の風況特性に及ぼす効果を評価する手法には、①現地強風観測、②風洞実験或は水槽実験、③計算機による数値シミュレーション、④地形因子を用いた統計解析が挙げられ、これらの研究手法は、それぞれ長所短所があり、互いに補完関係にあると考えられる。本研究では、手法③は使用しないが、他の手法を総合的に利用して議論を進めており、特に、方法②の地形模型を用いた風洞実験において、自然風を風洞内に再現する気流の相似性が最も重要な問題点となる。

本章においては、自然風を風洞内に模擬するための必要条件である気流の相似則について従来の研究を簡単に紹介するとともに、本研究において風洞内に作成した境界層乱流特性を簡単にまとめて示すものである。

2-2 風洞実験における相似則

風洞実験等によって大気の流れを調査する場合、模型に作用する自然風を相似させることが重要となる。模型実験をそのスケールで分類すると、①大気大循環などの地球規模の流れ、②山岳気流、海陸風等の流れ、③丘などの小地形・ビル風等の流れ、等になると考えられる。本研究で対象とするのは、③の小地形上の流れであることに注意して、気流の相似条件について検討を加える。模型実験の相似則については、種々の研究が成されているものの、自然現象の複雑さに起因して、未だ解決されていない問題点も残されている。^{2-1) - 2-4)}

地球上の流れを支配するのは、以下のような方程式となる。²⁻¹⁾

I. 運動方程式

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \nabla^2 u + f \cdot v \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \nabla^2 v - f \cdot u \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \nabla^2 w - g \frac{\Delta \rho}{\rho} \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

II. 連続の式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2-2)$$

III. 熱エネルギー保存式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \kappa \nabla^2 \theta \quad (2-3)$$

ここに、 x, y, z は、東、北、鉛直上向き方向とし、 u, v, w は、それぞれの方向の風速成分である。 ρ は密度、 P は圧力、 θ は温位、 g は重力加速度、 ν は渦動粘性係数、 κ は熱伝導係数、 f はコリオリの係数 ($f=2\omega \sin \alpha$, ω は地球の自転の角速度、 α は緯度) である。

代表的な、距離、風速、時間、温度等を用いて方程式を無次元化すると無次元量に*を付けると以下ようになる。

I. 運動方程式

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} + w^* \frac{\partial u^*}{\partial z^*} &= \frac{1}{\rho^*} \frac{\partial P^*}{\partial x^*} + \frac{1}{Re} \nabla_*^2 u^* + \frac{1}{Ro} v^* \\ \frac{\partial v^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial v^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial v^*}{\partial y^*} + w^* \frac{\partial v^*}{\partial z^*} &= \frac{1}{\rho^*} \frac{\partial P^*}{\partial y^*} + \frac{1}{Re} \nabla_*^2 v^* - \frac{1}{Ro} u^* \\ \frac{\partial w^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial w^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial w^*}{\partial y^*} + w^* \frac{\partial w^*}{\partial z^*} &= \frac{1}{\rho^*} \frac{\partial P^*}{\partial z^*} + \frac{1}{Re} \nabla_*^2 w^* + \frac{1}{Fr^2} \Delta \theta^* \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

II. 連続の式

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} = 0 \quad (2-5)$$

III. 熱エネルギー保存式

$$\frac{\partial \theta^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial \theta^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial \theta^*}{\partial y^*} + w^* \frac{\partial \theta^*}{\partial z^*} = \frac{1}{Pe} \nabla_*^2 \theta^* \quad (2-6)$$

ここに、 $x^*=x/L$, $u^*=u/U$, $t^*=tU/L$, $\theta^*=\theta/\theta$, $P^*=P/\gamma U^2$, $\rho^*=\gamma\theta/\theta$: $\Delta\rho/\rho_0=\Delta\theta/\theta\cdot\Delta\theta^*$

流れを支配する無次元量を、以下に示す。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{ロスビー数} & : R_o = U/Lf \\ \text{レイノルズ数} & : R_e = UL/\nu \\ \text{フルード数} & : F_r = U/(gL\Delta\theta/\theta)^{1/2} \\ \text{ペクレ数} & : P_e = UL/\kappa \end{array} \right\} \quad (2-7)$$

ロスビー数は、慣性力とコリオリ力の比を表わしており、本研究で対象としている比較的小領域の場合には、これを無視できる。また、フルード数は、慣性力と浮力の比であり、大気の安定度が中立に近い場合には大きな値となりこの影響は無視できる。レイノルズ数は、慣性力と粘性力の比であり、自然風は、一般に大きい値を有し、十分発達した乱流となる。ペクレ数は、熱輸送に関係する無次元量であり、レイノルズ数とプラントル数($P_r=\nu/\kappa$)の積で表現でき、プラントル数は、層流状態では流体固有の値を持ち、乱流では、リチャードソン数 $R_i=g/\theta\cdot(\partial\theta/\partial z)/(\partial u/\partial z)^2$ の関数となるが、大気が強い安定成層となる場合を除いてほぼ1と考えられることより、ペクレ数の相似は、レイノルズ数を一致させることに帰着する。²⁻¹¹⁾

ところで、本研究では、比較的小地形の風況特性に及ぼす影響を評価しようとするものであり、大気境界層を風洞内に設定することが重要であり、この場合の相似性の評価指標として、以下の項目が挙げられる。

- ①風速の鉛直分布
- ②乱れの強さ・スケールとその鉛直分布
- ③変動風速のスペクトル
- ④温度変動とその鉛直分布
- ⑤温度変動のスペクトル

本研究は、比較的強風時を対象とし、大気が中立安定時のみに注目することより、相似条件④、⑤は無視でき、条件①～③及びレイノルズ数(Re数)の一致が必要となる。

Re数については、臨界Re数以上の値の物体周りの流れは、Re数に大きく依存しないことが知られており、この特性を利用する方法、または、Cermakら²⁻⁵⁾によって提案されたものの(実際の自然風については、乱流Re数を、模型上の流れには、分子Re数(通常の分子粘

性係数を使用したRe数)を一致させる手法)を用いる方法がある。一方、根本²⁻⁶⁾は、Re数にとらわれず、乱れの構造が相似であれば平均流も相似になると仮定し、局所的な乱れの構造を特徴づける量として乱れの最小渦に着目し、最小渦を相似にする条件(最小渦の大きさ(Λ_s)と流れのスケール(L)の比及び、最小渦の速度(V_s)と風速(U)の比が自然風と風洞気流において共に一致すること、さらに、Kolmogoroffの局所等方性仮説を用いて、乱流エルルギー逸散率 ε が最小渦の速度の3乗に比例し、最小渦の大きさに逆比例すること($\varepsilon \propto V_s^3 / \Lambda_s$)から、以下の相似条件を導いている。

$$U_M/U_N = (\varepsilon_M/\varepsilon_N)^{1/3} \cdot (L_M/L_N)^{1/3} \quad (2-8)$$

ここに、添え字N、Mは、それぞれ、自然風、風洞気流に対応している。

また、井上²⁻⁷⁾は、中立安定な境界層の相似条件として、乱流Re数と乱れの強さの一致が必要であるとし、さらに、渦粘性係数が、乱れの大きさと、スケールの積によって得られることより、乱流Re数の一致は、乱流渦スケールと代表長さ(境界層厚さ等)の比を等しくすることと等価であるとしている。

地形模型実験においては、模型上流における乱流特性、地形特性を相似させる必要があり、研究対象地域より、上流側の地形、粗度等を忠実に再現する必要がある。市街地に対しては、前述の指標²⁻⁸⁾が一応得られているが、際限なく続く地形に対して相似な気流を得るための模型化範囲については未だ明確な指標はなく、研究者の判断によるところが大きいのが現況である。

2-3 本研究に使用した乱流境界層特性及び風洞実験概要

前項で、地形模型を用いた風洞実験における相似条件について簡単に検討を加えたが、ここでは、本研究において風洞内に作成した乱流境界層特性並びに風洞実験についてその概要をまとめて示す。

実験に使用した風洞は、徳島大学工学部多目的風洞(閉断面押込式エッフェル型風洞、測定部1.5mx1.5mx5m、0.5m/s~18m/s)である。測定胴が比較的短いため、風洞内にラフネスブロックを数詰めるだけでは十分発達した境界層厚さを得ることが不可能であり、短いフェッチで十分発達した境界層厚さを得るための種々の乱流境界層発生装置が提案されているが^{2-9)、2-10)}、本研究では、Irwin²⁻¹¹⁾によって提案されたスパイヤとラフネスブロックを組合せる手法を利用した。

表2-1に本研究において作成した乱流境界層の特性（境界層厚さ、べき指数 α ）をまとめて示した。また、図2-1、図2-2は、乱流境界層特性（平均風速、乱れの強さ及び、乱れのスケールの鉛直プロファイル）及び、変動風速のパワースペクトルの一例を示したものである。

表2-1④ 単純化地形模型実験に使用した境界層乱流

対象地形	主たる実験風速	べき指数 α	境界層厚さ／代表長	引用節
丘	5.0 m/s	0.17	0.4 / 0.05 = 8	6-3
谷	5.0 m/s	0.14	0.2 / 0.05 = 4	7-2-1
切通し	5.0 m/s	0.17 0.17	5 ($H=.05, .075, .1$) 0.4 / 0.05 = 8	7-2-2 7-2-2
半島	5.0 m/s	0.13	0.3 / 0.05 = 6	8-2

表2-1⑤ 縮尺地形模型実験に使用した境界層乱流

対象地域	縮尺	主たる実験風速	べき指数 α	境界層厚さ／代表長	引用節
下津井 瀬戸大橋 周辺部	1/3000	3.5 m/s	0.16	0.2 / (128/3000) = 4.7	5-3-3 6-4 8-3
与島 坂出市	1/2000	4.0 m/s	0.16	0.2 / (58/2000) = 6.9	5-3-3 6-4
与島周辺	1/4000	3.15 m/s	0.18	0.1 / (58/4000) = 6.9	5-3-3 6-4
湯谷坂ト ンネル部 (徳島県 鷺敷町)	1/500	5.0 m/s	0.3	0.8 / (190/500) = 2.1	7-3-1
大毛島 鳴門市	1/1500	4.4 m/s	0.17	0.2 / (198/1500) = 1.5	7-3-2④ 7-4-1 7-4-2
	1/1500	4.4 m/s	0.13	0.3 / (198/1500) = 2.3	7-3-2⑤ 7-4-3 8-3
	$S_H =$ 1/1000 $S_V = 1/500$	5.0 m/s	0.13 0.3 0.4	0.6 / (198/500) = 1.5	7-4-1 7-4-3

べき指数 α は、周辺部の地表粗度に大きく依存することが知られており、多くの観測から種々の地表形態におけるべき指数 α の値が求められている。また、Davenport²⁻¹²⁾ は大気境界層の高さ (z_G) と傾度風 (V_z) を基準とし、次式のように風速の鉛直分布を表示し、各種地表状態におけるべき指数 α の値と大気境界層高さの概略を表 2-2²⁻¹³⁾ のようにまとめている。

$$V_z/V_G = (z/z_G)^\alpha \quad (2-9)$$

表 2-2 各地表状態におけるべき指数 α 及び大気境界層高さ z_G

	地 表 条 件	α	$z_G(\text{ft})$
1	非常に滑らかな面：広い水面，低く平らな島	1/8.5	800
2	平地：草原，砂漠，凍土帯	1/7.5	900
3	やや大きい障害物のある平地またはなだらかな傾斜地： まばらな樹木や建物のある農場	1/6.5	1,000
4	障害物や障壁のあるゆるい傾斜地や平地： 壁，垣根及びまばらな樹木，建物のある野原	1/5.5	1,100
5	種々の大きさの障害物のある傾斜地や平地： 垣根や障害物の多い小さな農場	1/4.5	1,200
6	種々の大きい障害物が一樣にある傾斜地や平地： 森林，矮樹林	1/3.5	1,350
7	大きい障害物のある非常に粗い場所： 町，郊外，大都市の周辺，大きい樹木のある農場	1/3	1,500
8	非常に大きい障害物のある場所： 大都市の中心地	1/2.5, 1/1.5	1,800

ここに示されたべき指数 α の値からも明らかなように、本研究において使用された境界層乱流は、第 7 章における縮尺谷状地形模型実験（7-3-1 項、対象地点が山間部に位置している。）とべき指数 α の風況特性に及ぼす影響を調査した縮尺切通し状地形模型実験（7-4-3 項）を除くと比較的なだらかな地形周辺の気流特性を反映させたものである。また、乱れの強さ (I_u) とスケール (L_x) の鉛直分布は、各境界層乱流において類似した傾向が得られており、図 2-1 に示したように、乱れのスケールは、上空ほど大きくなり地表面付近で最小値となる。一方、乱れの強さは、逆に、地表面付近で最大値となり、上空程乱れの小さい流れとなる。そして、各境界層における乱れの強さの値は、べき指数 α と密接な関係があり、べき指数 α の増加と共に気流の乱れが大きくなり、自然

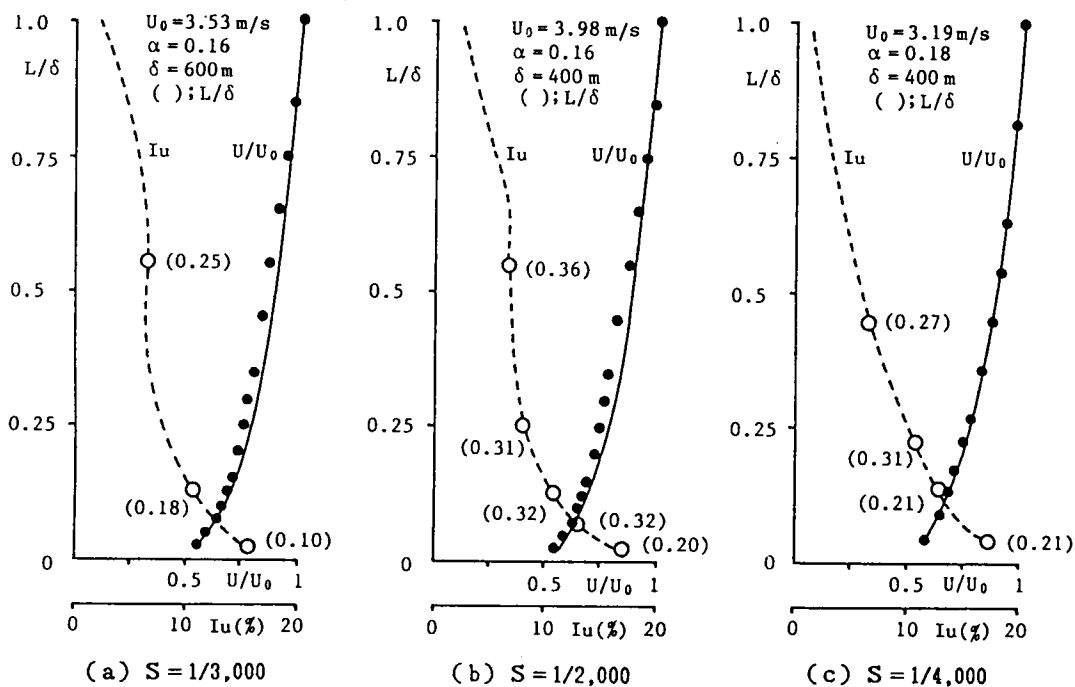


図 2-1 境界層乱流特性の一例

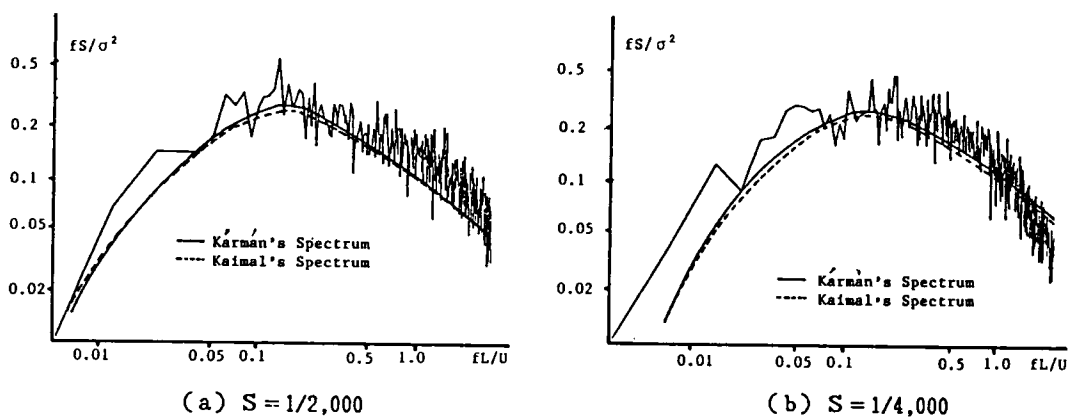


図 2-2 変動風速のパワースペクトルの一例 ($Z=100\text{m}$)

風における現象が再現されている。乱れのスケールには、特に、べき指数 α との相関性は見られず、模型縮尺を用いて実寸法に換算して自然風と比較すると、全体に若干小さめの値となっているようである。

また、変動風速のスペクトル密度は、等方性理論より導かれるKármán型スペクトル（式2-10）²⁻¹⁴⁾に良く対応しており、また、乱れのスケールをKármán型スペクトルから求めた値を使用して求めた修正Kaimal型スペクトル（式2-11）²⁻¹⁵⁾とも良く一致している。

Kármán型スペクトル

$$S(f) \cdot f / \sigma^2 = 4 \cdot L \cdot f / U \cdot (1 + 70.78 (f \cdot L / U)^2)^{-5/6} \quad (2-10)$$

修正Kaimal型スペクトル

$$S(f) \cdot f / \sigma^2 = 0.164 \cdot x / (1 + 0.164 \cdot (x)^{5/3}) ; \quad x = 26 \cdot L \cdot f / U \quad (2-11)$$

ここに、 $S(f)$ ：主流方向変動風速のスペクトル密度関数（片側スペクトル）

U ：主流方向平均風速、 σ^2 ：主流方向変動風速の分散

L ：主流方向成分乱れのスケール、 f ：周波数

したがって、本研究における各境界層乱流は、一般的な自然風を風洞内に再現したものと考えられる。しかし、現実の地形においては、周辺の地形等によって風速の鉛直分布等の乱流特性は非常に複雑になることが予想され、本研究では、理想化された自然風を対象としていること、並びに、限定された境界層流中における現象に注目した実験であることに注意が必要である。

以上簡単に、風洞内に作成した乱流境界層特性の概要を示したが、本研究においては表2-1に示された地形特性を簡略化した単純化地形模型並びに縮尺地形模型を用いた風洞実験によって、各地形周辺部の風況特性の調査を行なっている。風況特性を把握するために、各実験においては、風速（平均風速、最大風速、変動風速）、風向、及び、流れの可視化の3項目について測定を行なっており、実験方法と実験使用機器・装置について各測定項目毎に簡単に示す。

まず、風速測定は、熱線風速計（KANOMAX, Model 1011, 1013, 1017, 1018, 1020, 1075）と I 型の熱線プローブ（Model 0247-T5）を用いて行ない、信号解析器（岩崎通信機 K.K., SM 2701）を用いて、平均風速、最大風速、変動風速の標準偏差・スペクトル・自己相関係数を求めている。熱線プローブの測点への設定にはトラバース装置を用いているが、トラバース装置の精度、地表面の起伏等を考慮して、図 2-3 に示すようなピンをプローブ先端に設置し、計測点にプローブを鉛直に支持し、風洞主流方向に設定している。したがって、気流に鉛直成分が含まれる場合には、計測精度に問題がある。なお、ピンの風速値に及ぼす影響は、ほとんどないことは別途確認されている。

風向に関しては、計測点上に、発泡スチロール製の小旗（5×10mm、図 2-4）を立て、小旗の動きをビデオ並びに写真撮影し、平均風向と乱れの様子を調査している。ピンの高さを調節することによって任意点の風向特性が調査できる。

流れの可視化は、各地形周辺部の定性的な風況特性の把握に有効なものであり、本研究では、ドライアイスを用いて行ない、風向測定と同様にビデオ並びに写真撮影している。

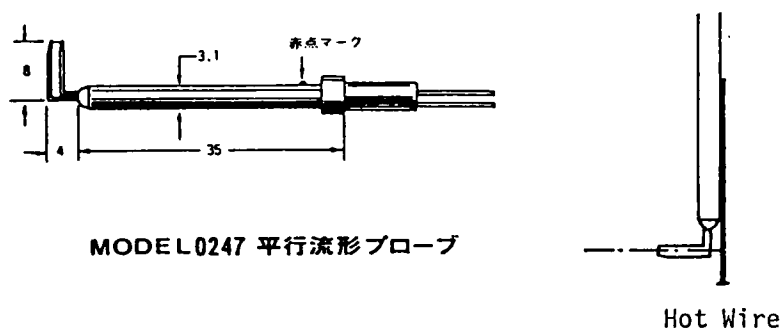


図 2-3 熱線プローブ概略

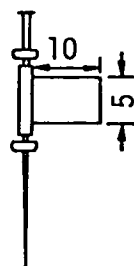


図 2-4 風向検出用小旗

第3章 地形因子解析とそれに基づく風況特性

3-1 概説

大型構造物、特に、橋梁の設計においては、風荷重は断面を決定付ける重要な外力であり、安全で経済的な設計を行なうためには、風の作用の正確な評価が必要となる。耐風設計の基本となる建設地点における風の特性は、任意建設地点における中長期に渡る風観測が一般的には非現実的であることより、地形因子解析或は、短期風観測値を用いて近隣気象官署等における観測値との相関等によって推定されている。しかし、橋梁等の構造物は、強風の作用する方向も風速値と同様に耐風安定性に大きく寄与することが知られており、風向別に風況特性を把握することが重要となる。また、建設地点の風向特性は、周辺地形と密接な関係があることが予想されることより、本章においては、地形因子解析を用いて南西諸島を除く全国125地点の気象官署における風向別風速の推定を試み、風況特性を支配するメソスケール並びにミクロスケールにおける地形因子を抽出しようとするものである。また、気象条件・地形特性等に差のない地域を選定し、より詳細に地形因子の風況特性に及ぼす効果についても検討を加える。さらに、推定値と観測値の対応の悪い測点については、本解析に使用した地形因子では説明できない強風発生要因となる地形特性を検討することにより、特異な風（局地風及び局所風）と、地形因子間の対応関係を探ろうとするものである。

3-2 地形因子及び解析手法

解析に使用した方位別風速データの算出には、気象庁による1961年～1984年（24年間）の定時観測データ³⁻¹⁾（3時間毎の毎正時直前10分間の平均風速とその風向（以後、時別値データと呼称する。）及び日最大風速とその風向（以後、日別値データと呼称する。）を用いた。なお、風向は、16方位に分類されている。本論文では、地形特性と風況特性間の対応関係に注目していることより、風速計設置高さ、風速計測器の変更等に対する補正並びに各方位別再現期待値の算定は、特に行なわず、時別値データより各方位別年平均風速を算出し、日別値データ並びに時別値データより各方位別年最大風速を求め、24年間の方角別最大風速を算出した。

地形因子データの抽出には、国土地理院により磁気テープに整理された標高データ³⁻²⁾

を主として用い、各測点近傍の因子は、縮尺1/25000の地形図と併用した。地形因子は、表3-1、及び、図3-1に示す全国125気象官署における各方位毎の地形特性を示す方位別因子（ここでは、8方位を考慮し、図3-2に示す45°の扇状区画内の地形因子）と各測点の地形特性を代表する共通地形因子（円形区画内の代表地形因子、従来の風向を考慮していない解析に使用されていた地形因子）の2種類について、半径R=1、3、5、10、20、30、40、50、60kmの各領域について算出した。なお風速データは、16方位において得られているが、方位別地形因子は、方位別風速と地形特性の対応が得られることが期待できる最小方位として、東・西・南・北にその中間方位を加えた8方位とした。

本研究において考慮した地形因子は、以下に示すように、従来よりよく使用されている因子（①～⑥）と、さらに、風況特性に影響を及ぼすことが期待できる新たな因子（⑦、⑧）を加えた8種類とした。

①起伏度：最大高度地点と対象地点の標高差（m）及びその勾配

②陸度：陸の割合（％）

③海度：湖水、河川等を含めた海の割合（％）

④海岸距離：海までの最短距離（0.1km）

⑤障害距離：対象点よりHm以上高い地域を障害域とし、障害域

までの最短距離（0.1km、H=100-300m）

⑥開放度：前述の障害域を除いた開けた部分の角度の和の全領域に対する比（％）

⑦丘度：丘状地形では風速が増速されることが知られており、この特性を地形因子解析に取り込んだものであり、対象地点と最低地点間の標高差（m）及びその勾配。

なお、本因子は局所的な地形因子であり、半径R=5kmについてのみ求めた。

⑧平均標高：対象領域の平均標高（m）

さらに、各測点の緯度・経度・風速計設置高度も共通因子として説明変数に加えた。

解析は、各測点における風向別風速値を被説明変数とし、上述の地形因子を説明変数とした重回帰分析（ステップワイズ法）により行なった。なお、本研究で対象とした南西諸島を除く125気象官署における8方位の風速値（合計1,000個）は全て独立と考え、各風向に対応した方位の地形因子（上流側地形因子）のみならず下流側或は両側面等の各方向の地形因子の及ぼす影響も評価できるようにした。（式3-1、図3-2参照）

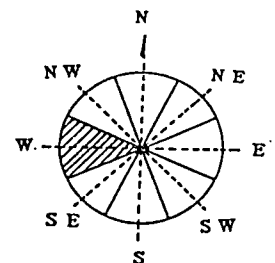


図 3-2 方位別因子の扇形区画

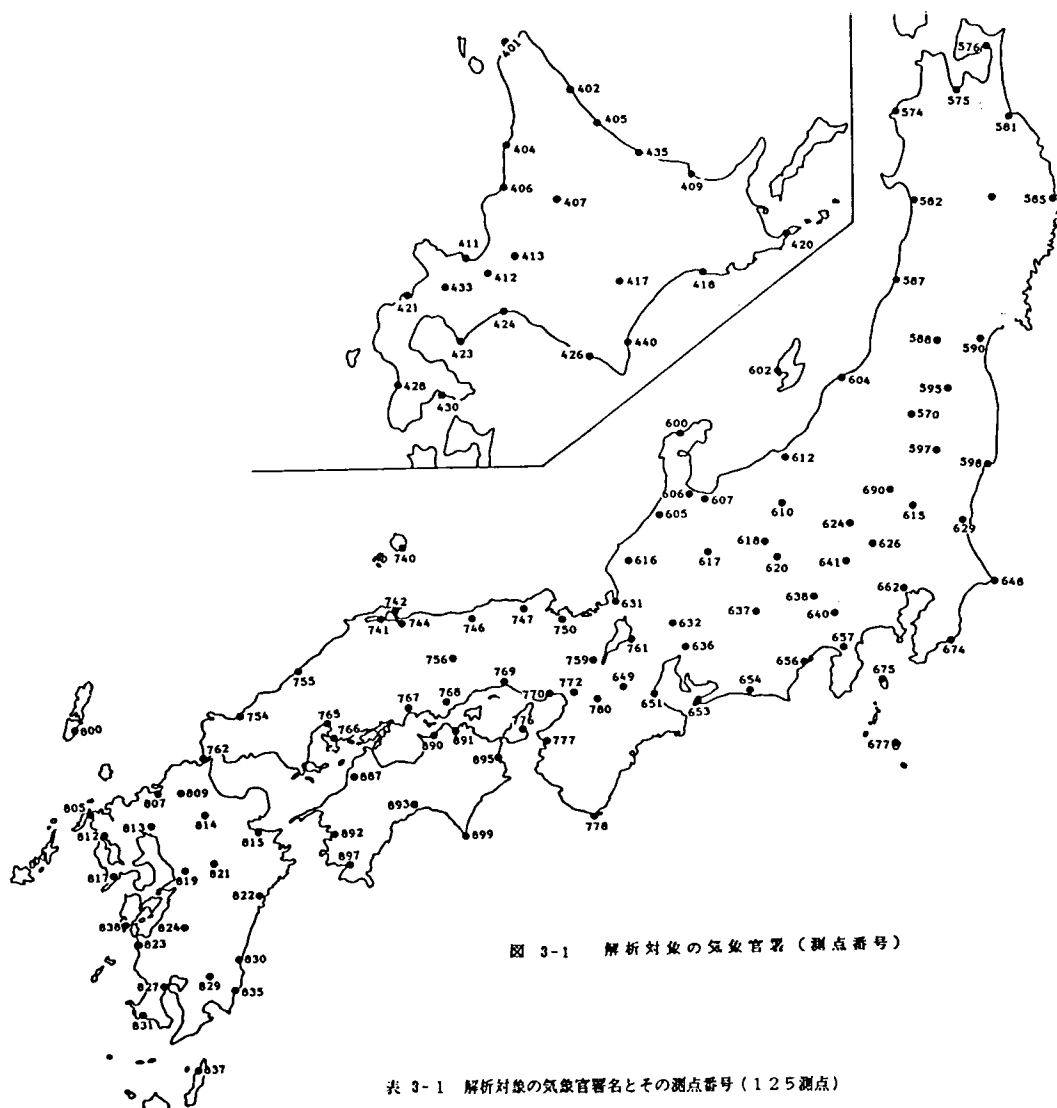


図 3-1 解析対象の気象官署（観点番号）

表 3-1 解析対象の気象官署名とその観点番号（125観点）

401 稚内地方気象台	576 むつ測候所	624 前橋地方気象台	744 米子測候所	812 佐世保測候所
402 北見枝幸測候所	581 八戸測候所	626 熊谷地方気象台	746 鳥取地方気象台	813 佐賀地方気象台
404 羽根測候所	582 秋田地方気象台	629 水戸地方気象台	747 豊岡測候所	814 日田測候所
405 雄武測候所	584 盛岡地方気象台	631 敦賀測候所	750 舞鶴海洋気象台	815 大分地方気象台
406 留萌測候所	585 宮古測候所	632 岐阜地方気象台	754 萩測候所	817 長崎海洋気象台
407 旭川地方気象台	587 酒田測候所	636 名古屋地方気象台	755 浜田測候所	819 熊本地方気象台
409 網走地方気象台	588 山形地方気象台	637 飯田測候所	756 津山測候所	821 阿蘇山測候所
411 小樽測候所	590 仙台管区気象台	638 甲府地方気象台	759 京都地方気象台	822 延岡測候所
412 札幌管区気象台	592 石巻測候所	640 河口湖測候所	761 彦根地方気象台	823 阿久根測候所
413 岩見沢測候所	595 福島地方気象台	641 秩父測候所	762 下関地方気象台	824 人吉測候所
417 帯広測候所	597 白河測候所	648 熊子地方気象台	765 広島地方気象台	827 鹿児島地方気象台
418 釧路地方気象台	598 小名浜測候所	649 上野測候所	766 呉測候所	829 都城測候所
420 根室測候所	600 輪島測候所	651 津地方気象台	767 福山測候所	830 宮崎地方気象台
421 寿都測候所	602 相川測候所	653 伊良湖測候所	768 岡山地方気象台	831 枕崎測候所
423 室蘭地方気象台	604 新潟地方気象台	654 浜松測候所	769 姫路測候所	835 油津測候所
424 苫小牧測候所	605 金沢地方気象台	656 静岡地方気象台	770 神戸海洋気象台	837 種子島測候所
426 浦河測候所	606 伏木測候所	657 三島測候所	772 大阪管区気象台	838 牛深測候所
428 江差測候所	607 富山地方気象台	662 東京管区気象台	776 洲本測候所	887 松山地方気象台
430 函館海洋気象台	610 長野地方気象台	674 藤浦測候所	777 和歌山地方気象台	890 多度津測候所
433 倶知安測候所	612 高田測候所	675 大島測候所	778 潮岬測候所	891 高松地方気象台
435 紋別測候所	615 宇都宮地方気象台	677 三宅島測候所	780 奈良地方気象台	892 宇和島測候所
440 広尾測候所	616 福井地方気象台	690 日光測候所	800 岐阜測候所	893 高知地方気象台
570 若松測候所	617 高山測候所	740 西郷測候所	805 平戸測候所	895 徳島地方気象台
574 深浦測候所	618 松本測候所	741 松江地方気象台	807 福岡管区気象台	897 宿毛測候所
575 青森地方気象台	620 諏訪測候所	742 境測候所	809 飯塚測候所	899 室戸岬測候所

$$y(m, n) = \sum a_i \cdot x_i + \sum a_j \cdot x_{jk} + a_0 \quad (3-1)$$

ここに、 y ：風向別風速値、 m ：測点数（1～125）、 n ：風向（1～8）、
 x_i ：共通地形因子、 x_{jk} ：方位別地形因子、 j ：方位別地形因子の種類、
 k ：方向を示す引数（1～8：上流側から順次時計回りに与える。）、
 a_i, a_j ：変化偏回帰係数、 a_0 ：定数項

3-3 地形因子解析による地形と風況特性の対応関係

3-3-1 共通地形因子の最大風速に及ぼす影響

まず、予備的に、共通地形因子（従来法において使用されていた因子）を用いて各気象官署において24年間に観測された既往最大風速の推定を行なった。表3-2～表3-4及び図3-3～図3-5に説明変数を取り込む基準を順次厳しくした場合の解析結果（各図の縦軸が推定風速であり、横軸が観測値である。）を示した。回帰式に取り込まれた説明変数の多いCASE 1では、重相関係数が約0.87とかなり高い値を有しているが、風速と地形特性の対応関係は、かなり曖昧となっている。説明変数を取り込む基準を厳しくした場合には、重相関係数は、CASE 1と比較すると若干減少しているものの比較的高い値を示しており、最大風速と最も関係の強い地形因子が抽出されていると考えられる。抽出された地形因子は、陸度・開放度・起伏度の3種類であり、それぞれの地形因子の偏回帰係数の正負も、それぞれの地形因子の風速に及ぼす効果と一致している。特に、陸度は、半径1kmの特性が、最も風況に影響を及ぼすという解析結果が得られており、各測点近傍の地表面粗度をより詳細に表現する因子をさらに追加する必要があると考えられる。また、これらの解析において、常に緯度が、説明変数として関与しており、偏回帰係数の符号から判断すると、北に位置する測点ほど風速が低下することを意味している。このことは、台風による強風が支配的である我国の強風特性の一端、すなわち、台風の襲来頻度の高い南方の気象官署ほど最大風速が大きくなることが示されており、台風と地形特性に関する研究の重要性が示されていると考えられる。

表3-5及び図3-6は、共通地形因子のみを用いた全国気象官署の風向別最大風速推定結果を示したものである。前述の風向を考慮しない24年間の既往最大風速の推定結

表 3-2 共通因子による解析 (CASE 1)

重相関係数	0.8694
寄与率	0.7559
最小許容 F 値	1.0000
最大許容 F 値	1.0000
回帰による自由度	31
回帰式に取り込まれた因子	偏回帰係数
緯度	-0.8254
風速計設置高度	0.0429
起伏度	0.0125
R= 1km	0.0033
R=50km	-0.0030
R=60km	0.0441
平均標高	R= 1km 0.0441
	R= 3km -0.1159
	R=10km 0.0411
	R=20km -0.0592
	R=30km 0.0675
	R=40km -0.0255
陸度	R= 1km -0.2084
	R=10km -0.2465
	R=60km -0.1208
海度	R= 3km -0.1577
	R=20km -0.1871
開放度 $H \geq 100m$	R= 5km 0.0143
	R=10km -0.0159
	R=50km 0.1404
	R=60km -0.0954
開放度 $H \geq 200m$	R=10km -0.0306
	R=20km 0.0610
	R=50km -0.1126
	R=60km 0.0643
開放度 $H \geq 300m$	R=10km 0.0352
	R=30km -0.0871
	R=40km 0.0859
	R=60km -0.0439
起伏度 R= 5km	高低差 -0.0026
	勾配 0.0251
丘度 R= 5km	勾配 -0.0042
定数項	96.1102

表 3-3 共通因子による解析 (CASE 2)

重相関係数	0.7503
寄与率	0.5630
最小許容 F 値	3.0000
最大許容 F 値	3.0000
回帰による自由度	5
回帰式に取り込まれた因子	偏回帰係数
緯度	-0.7559
陸度	R= 1km -0.1246
	R=10km -0.0445
開放度 $H \geq 50m$	R=30km 0.0210
起伏度 R= 5km	高低差 -0.0024
定数項	64.3048

表 3-4 共通因子による解析 (CASE 3)

重相関係数	0.7238
寄与率	0.5239
最小許容 F 値	10.0000
最大許容 F 値	10.0000
回帰による自由度	3
回帰式に取り込まれた因子	偏回帰係数
緯度	-0.7238
陸度	R= 1km -0.1428
開放度 $H \geq 50m$	R=30km 0.0306
定数項	59.6360

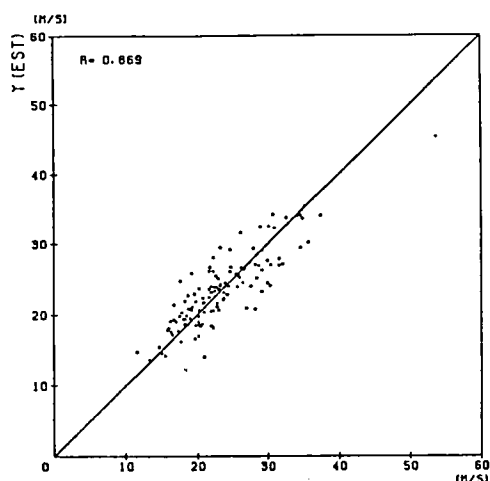


図 3-3 共通因子による解析 (CASE 1)

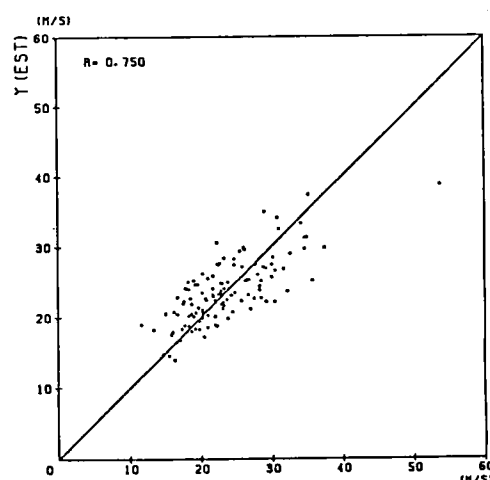


図 3-4 共通因子による解析 (CASE 2)

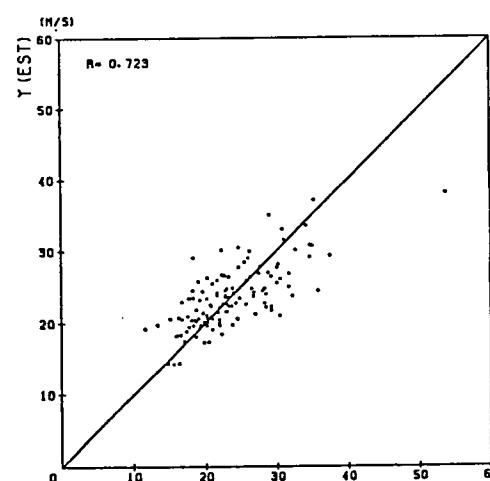


図 3-5 共通因子による解析 (CASE 3)

果と比較すると、緯度の影響がなくなり、経度が取り込まれている。これは、同一観測地点において、風向の変化に対して作用する風速が大きく異なること、また、冬期の季節風の影響が反映されたこと等によるものと考えられる。また、方位別地形因子のみによる解析結果の一例として、図3-7に8方位全ての因子を使用した結果を、また、図3-8には、上流側因子のみ使用した場合の結果を示す。これらの解析結果より、方位別因子のみによる風速の推定は誤差が非常に大きく、より良い推定には、各地点の地形特性を代表する共通地形因子により各測点における代表的な風速を与え、方位別地形因子によって各風向間に地形特性に基づいた風速差を与えると良いことが明らかである。

表3-5 共通因子による重回帰分析
(24年間の風向別最大風速)

説明変数	偏回帰係数	T値
経度	-0.2535	-4.1471
風速計設置高度	0.0542	7.8087
起伏度	0.0015	2.2617
平均標高	-0.0600	-7.2888
	R=20km	0.0034
	R=5km	1.8295
	R=50km	-3.4614
陸地	R=1km	0.2518
	R=50km	3.3219
海面	R=5km	2.2257
	R=60km	4.4245
障害距離 $H \geq 100m$	-0.0996	-1.5097
海岸距離	0.0500	2.5094
開放度 $H \geq 50m, R=5km$	0.0154	2.4876
	R=20km	-2.7450
	R=40km	5.9426
	R=50km	-3.1089
$H \geq 100m, R=5km$	-0.0138	-2.2307
	R=10km	-2.6466
$H \geq 200m, R=20km$	0.0428	4.6394
	R=60km	-4.1198
$H \geq 300m, R=40km$	-0.0167	-2.4903
CONSTANT	0.71	
重相関係数	0.589	
寄与率	0.3464	
回帰による自由度	20	

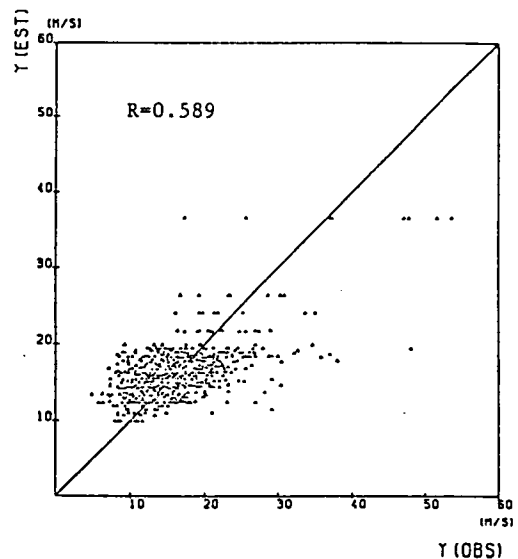


図3-6 風向別最大風速の共通因子のみによる推定値と観測値 $R=0.589$

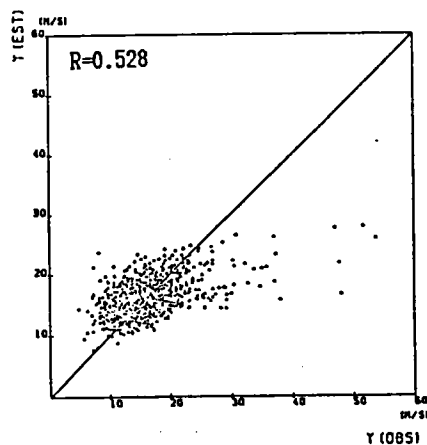


図3-7 8方位の方向別地形因子を用いた風向別最大風速の推定値と観測値

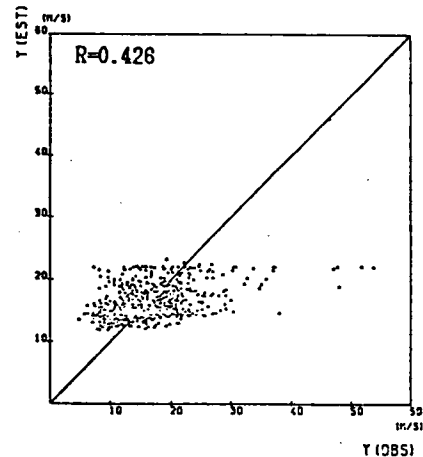


図3-8 上流側の地形因子のみを用いた風向別最大風速の推定値と観測値

3-3-2 全国を対象とした場合の地形と風況特性の対応関係

前項に示したように、解析は共通地形因子と方位別地形因子を組み合わせて行なうものとし、方位別因子も全方向について考慮すると精度の向上が期待できるものの非常に推定式が複雑となることが予想され、上下流側並びに主風向に直交する両側の合計4方向の因子を共通地形因子に加えた解析を行なった。また、解析に使用した因子の抽出領域に関しては、図3-9に示すように地形因子抽出対象半径を変化させたときの重相関係数は、全て小さい値となり、半径5kmで若干大きくなっているものの、特に大きな差は生じていない。しかし、宮田らによる上流側地形因子のみによる方位別風速の解析によると、地形因子抽出対象半径の増加と共に相関係数が上昇することが報告されており³⁻³⁾、本研究では、メソスケールの地形に対しては、抽出した対象領域の最も広い半径60kmを使用し、局所スケールを代表するものとして半径5kmとし、両者を組み合わせて用いることとした。

表3-6、図3-9、図3-11は、それぞれ全国125測点の風向別最大風速と平均風速の推定結果である。なお、表中の記号は、○印が共通因子、●、◐、◑、◒は、それぞれ、方位別因子の上流側、右側面、下流側、及び、左側面に対応し、数字は、偏回帰係数であり、正值は風速の増加（負値は減速）に対応している。解析結果は、同一取り込み基準、同一因子を使用したにも拘らず、平均風速の推定精度が高くなり、さらに、取り込み基準を厳しくし、説明変数を少なくしても推定精度は最大風速より若干良く、平均風速（通常風）は、地形とより密接な対応関係があると考えられる。推定式に取り込まれた地形因子を比較すると、両者とも類似した因子が選択されている（海度、起伏度、丘度）が、最大風速においては、さらに、緯度・風速計設置高度等の地形因子以外の条件も取り込まれている。一方、平均風速の解析結果においては、丘度より開放度の影響が大きくなっている。従って、通常風（平均風速）は、観測点の位置（緯度・経度）の影響は小さく、周辺地形特性を代表する地形因子（海度、起伏度、及び、最大風速には取り込まれていない開放度）と相関が大きいことが明らかである。

また、最大風速に関して、推定値と観測値の残差が大きいもの（推定値が観測値より大きくなる過大評価地点、及び、推定値が小さくなる過小評価地点）を抽出し、支配的な地形因子を推定した結果を、表3-7、図3-12に示す。この解析は、全データを用いて評価したときには、平滑化された最大風速値の推定がなされ、他風向と比較して強風が作用している風向の風速値が過小に評価される可能性があり、より正確に地形因子と風速の関係を明らかにする目的で実施した。

まず、観測値より推定値が小さくなっている過小評価点（過小評価率が10%、20%、30% 以上のものを対象）に注目すると、全測点を対象とした場合より、大幅に推定精度が向上している。これは、地形因子解析に用いるデータ数の減少もその一因と考えられるが、類似した地形特性を有する測点が抽出されたことに起因すると考えられる。（同一個数のデータを無作為に抽出して解析を行なうと相関係数は0.63程度となる。）得られた説明変数は、全測点の解析結果と大差ないものの、緯度、海度、及び、丘度の偏回帰係数の値が大きくなると共に、定数項も大きな値となっている。一方、過大評価点の解析結果は、過小評価点の解析結果とは逆に、定数項、海度、緯度の偏回帰係数が小さくなっている。従って、丘度、海度は、風速を支配する代表的な地形因子であることが明らかであるが、定数項の値が、各解析によって大きく変化しており、本解析に使用した地形因子以外にも風速を支配する地形因子が存在すること及び、本解析に使用した直径60km以上のより大規模な地形特性の及ぼす影響も無視できないことが予想され、前項で指摘された地表粗度等の因子を含め、この点についてもさらに検討を要する。また、測点周囲の地形特性またはある代表的な地形因子から、各風向について、過小評価、或は、過大評価になる可能性があることが判明できれば、本解析に使用した推定式も任意地点の風向別風速の推定にかなり有効となる。しかし、過大評価・過小評価の判定基準について、種々の検討を加えたが、未だ明確な判定基準が定まっておらず、この判定基準の確立についても、さらに検討する必要がある。

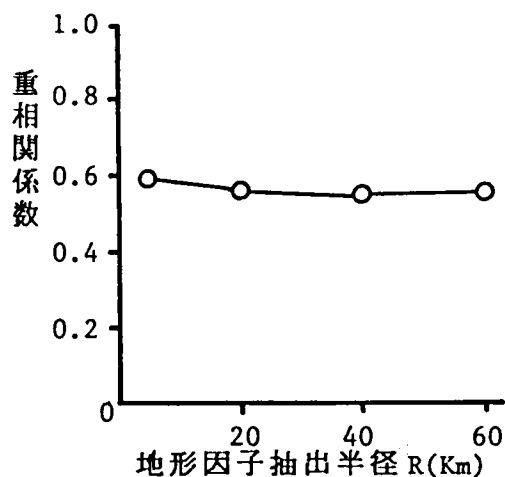


図3-9 地形因子抽出範囲と重相関係数

表 3-6 日本全国の風向別最大及び平均風速解析結果

	最大風速	平均風速 ㊤	平均風速 ㊦
重相関係数	0.617	0.686	0.680
最大最小許容F値	7.0	7.0	10.0
回帰による自由度	12	11	9
定数項	19.93	1.40	1.57
緯度	-0.2176		
経度			
風速計設置高度	0.0293	0.0053	0.0058
平均標高 R=5km	○ -0.0287	○ -0.0053	○ -0.0057
R=60km			
海度 R=5km	○ 0.0394	○ 0.0119	○ 0.0109
○ 0.026	○ 0.005	○ 0.0046	
R=60km	○ 0.045	○ 0.0097	○ 0.0095
○ 0.0218	○ 0.0054	○ 0.0049	
海岸距離		○ 0.0015	
障害距離 H>300m			
起伏度 高低差	○ -0.0014		
R=5km 勾配	○ 0.0146	○ 0.0028	○ 0.0014
R=60km 高低差	○ 0.0011	○ 0.0002	○ 0.0002
丘度 高低差	○ 0.0049		
○ -0.0066	○ 0.001		
R=5km 勾配			
R=5km, H>100m			
開放度			
R=60km, H>300m		○ 0.0036	○ 0.0033

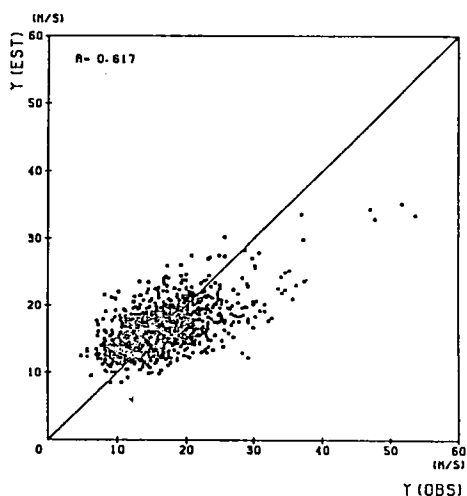


図 3-10 最大風速推定

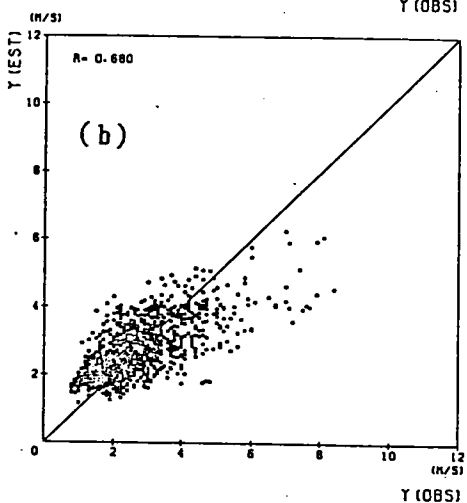
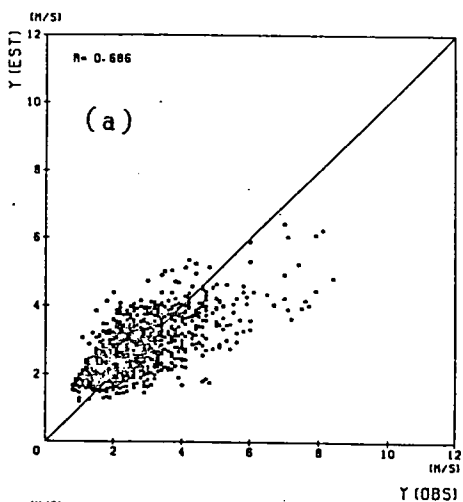


図 3-11 平均風速推定

表3-7 過小評価(-)及び過大評価(+)地点の風向別最大風速解析結果

	全測点	残差-10%以上	残差-20%以上	残差-30%以上	残差+10%以上
重相関係数	0.617	0.878	0.921	0.969	0.803
回帰による自由度	12	11	8	10	14
定数項	19.93	33.76	35.01	37.72	12.86
緯度	-0.2176	-0.4361	-0.4839	-0.5956	-0.122
経度					
風速計設置高度	0.0293	0.035			0.02
平均標高 R=5km	○ -0.0287	○ -0.0347			○ -0.0187
R=60km					
高度 R=5km	○ 0.0394 ○ 0.026	○ 0.0704 ○ 0.0372	○ 0.14	○ 0.1073	○ 0.017
R=60km	○ 0.045 ○ 0.0218	○ 0.0565 ○ 0.0258 ○ -0.027	○ 0.0727	○ 0.073 ○ 0.0212	○ 0.0389 ○ 0.022
海岸距離				○ 0.0123	
障害距離 H>300m					
起伏度 高低差	○ -0.0014	○ -0.0018	○ -0.0041	○ -0.0048	○ -0.0012 ○ -0.0026
R=5km 勾配	○ 0.0146	○ 0.0143	○ 0.0382	○ 0.0342	○ 0.0112
R=60km 高低差	○ 0.0011		○ 0.0017		○ 0.0007
丘度 高低差	○ 0.0049	○ 0.0107	○ 0.025	○ 0.0447	○ 0.0048
R=5km 開放度	○ -0.0066		○ 0.0162	○ 0.0118	○ -0.0034
勾配					○ 0.0951
R=5km, H>100m				○ 0.0379	○ 0.0136
R=60km, H>300m					

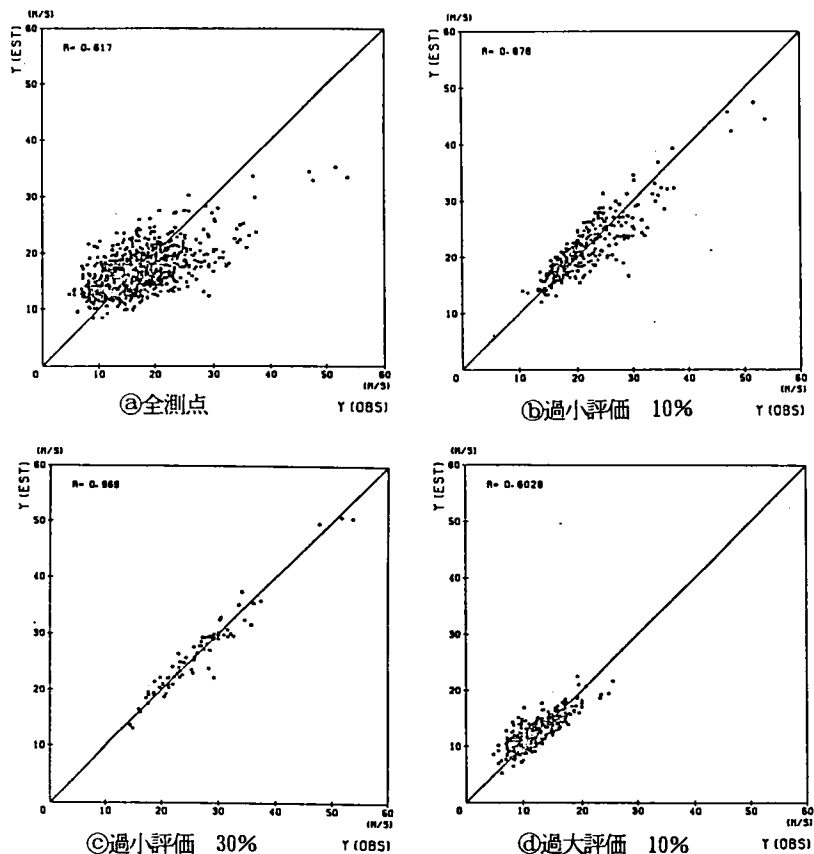


図 3-12 最大風速推定 (全国)

3-3-3 地域別解析による地形と風況特性の対応関係

最大風速は、地形特性の影響も大きいが、我国のような台風常襲地域では台風の影響すなわち、地域間で台風来襲頻度・台風の強さ等が異なることも推定精度が悪くなる一因と考えられるため、各地域別に風速の推定を行った。

最大風速に対する解析結果の一例（中国・四国地方25測点（データ数、 $25 \times 8 = 200$ 個）、九州19測点、太平洋沿岸27測点、日本海沿岸27測点、及び、内陸部27測点）を表3-8並びに図3-13に示す。

内陸部を除いた各解析結果は、全国を対象とした場合より、重相関係数が高くなっている。これは、測点数の減少による推定精度の向上もその一因と考えられるが、最大風速発生要因が固定され、作用する風に及ぼす地形特性の影響がより明らかになっているものと考えられる。例えば、図3-14に示すように、室戸岬の風速推定値は全国を対象とした解析結果（実線が解析結果、○印が観測値）においては、過小評価となるが、地域（中国・四国地方）を考慮することによって、各風向において比較的良好な推定が成されていることが明らかである。この差は、対象測点を限定することにより、回帰式に取り込まれた説明変数が少なくなっているものの、丘度の係数が非常に大きくなっており、風速と局所地形特性の関係がより明確に説明できたことに起因していると考えられる。また、このことは、風向特性を評価する方位別因子の取込まれた数を用いても説明できる。すなわち、全データを用いた解析では、取込まれた共通因子が6個、方位別因子も6個（海度3因子と丘度（上・下流側）、及び、起伏度）であるが、極端な例であるが、九州地方の解析においては、共通因子は緯度のみで、方位別因子が10個（海度・起伏度・丘度・開放度）となっている。また、太平洋岸測点においても、方位別因子が6因子（起伏度・海度）、共通因子は3個（経度、平均標高・丘度）のみである。また、解析結果における共通因子の持つ性質（定数項を同時に考慮する）が、全国を対象とした解析では各風向の平均値的な値を示すのに対し、地域別解析においては、最小値的な値となり両者で異なっている。

さらに、類似した地形特性を有していると考えられるにも拘らず地域間で風速差が大きくなる場合には、地形因子以外の緯度（九州地方の解析：負の係数、南九州の風速値が大きくなる。）・経度（太平洋沿岸：負の係数、西日本沿岸部において高風速となる。）等が説明変数として取込まれており、これも台風の影響と考えられる。一方、日本海沿岸部の観測点の推定では、重相関係数の値は小さいものの、緯度・経度は、共に関与せず、

表3-8 地域別最大風速解析結果

	全 国	中国・四国	九 州	太平洋沿岸	日本海沿岸	内 陸
重相関係数	0.617	0.758	0.738	0.769	0.627	0.497
最大最小許容F値	7.0	7.0	5.0	5.0	7.0	1.0
回帰による自由度	12	7	11	9	8	13
定数項	19.93	11.0	102.58	33.80	16.85	12.63
緯度	-0.2176		-2.8636			
経度				-0.5856		
風速計設置高度	0.0293					
平均標高 R=5km	○ -0.0287					
R=60km				○ -0.0157		
高度 R=5km	○ 0.0394 ○ 0.026	○ 0.0451	○ 0.0535	○ 0.0564	○ 0.0293	
R=60km	○ 0.045 ○ 0.0218	○ 0.0373	○ 0.0296 ○ -0.0256 ○ 0.0331	○ 0.0333 ○ 0.0287	○ -0.0728 ○ 0.0416	○ 0.4466 ○ -0.0579
海岸距離					○ 0.0196	○ 0.0181 ○ -0.0067 ○ -0.0079
障害距離 H>300m						
起伏度 高低差	○ -0.0014					
R=5km 勾配	○ 0.0146			○ -0.1195	○ -0.2442	○ -0.1661
R=60km 高低差	○ 0.0011	○ 0.0043 ○ -0.0055	○ 0.0021	○ 0.0019 ○ 0.0026	○ -0.0023	○ 0.0008 ○ 0.0006
丘度 高低差	○ 0.0049 ○ 0.0066	○ 0.1124	○ -0.008 ○ -0.0081	○ 0.0636		○ 0.0061
R=5km 勾配		○ -0.1904 ○ 0.1528	○ 0.1199		○ 0.2529	○ 0.0559
R=5km, H>100m			○ 0.0251 ○ 0.0249		○ 0.034	○ -0.0119
開放度						○ 0.0264 ○ 0.0137
R=60km, H>300m						

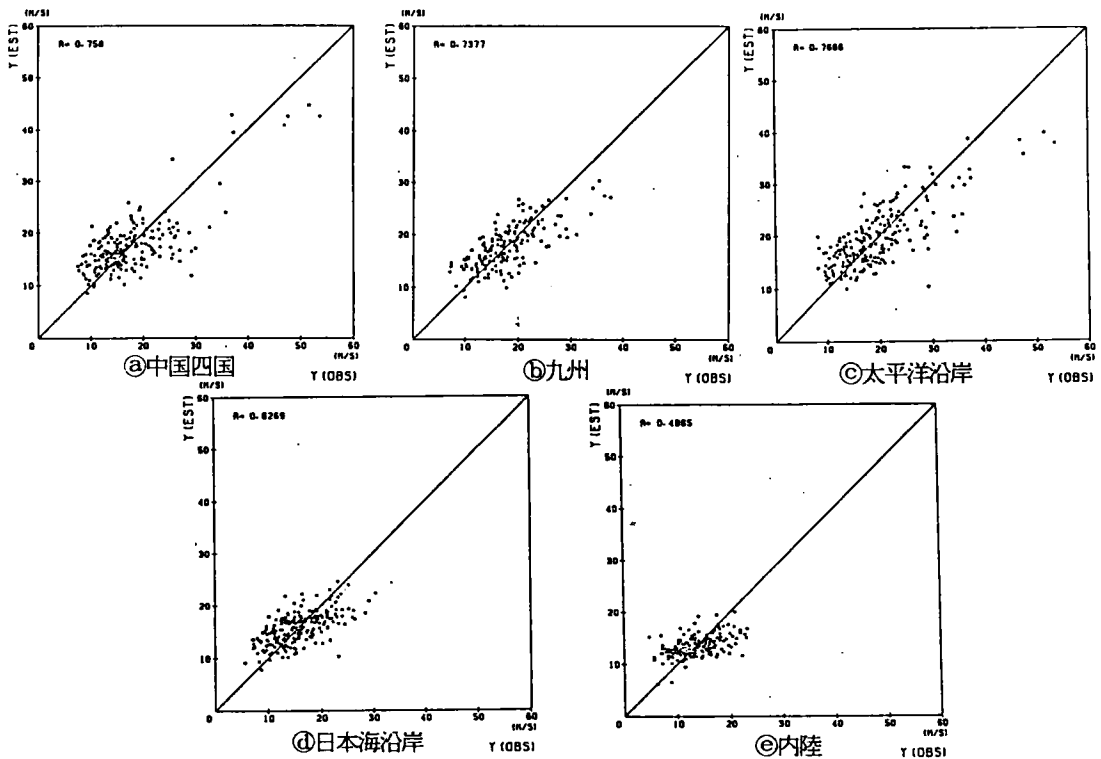


図 3-13 地域別最大風速解析結果

例えば、九州北部と北海道西部の観測点が同一の地形因子で解析可能であることが示されており、日本海沿岸部における支配的な強風発生要因として、台風よりむしろ冬期の季節風が挙げられよう。

内陸部の測点を取り出した解析では、全国の風速推定より説明変数が多いにも拘わらず重相関係数が小さくなる。また、異なる地形因子を説明変数として回帰分析を実施した結果、重相関係数が0.6 を越えることはなく、非常に推定精度が悪いことが明らかとなった。内陸部では、周辺の山々の存在によって気流特性が大きく変化し、本解析に用いている方位別因子が、必ずしも風の作用線と一致しないことも予想さる。このことは、得られた回帰式に多数の風向直角方向の地形因子が取り込まれていることと対応していると考えられ、このことも推定精度が悪化した一因に挙げられる。他の要因として、局地風が考えられ、その一例として、松本の南風が挙げられる。図3-15は、松本における推定値と観測値を示したものであり、推定値は、風向による影響をほとんど受けず円形に近い分布を示しているが、観測値は、南風が他風向と比較して際だって強くなっている。松本に作用する南風は、宇田川³⁻⁴⁾・杉原、浅井³⁻⁵⁾らの研究によると、上空風の風向が西～南西となったとき、飛騨山脈の山岳効果と松本平（谷幅が広がっている）に発生する局所低気圧によって発生する局地風（低気圧内に谷沿いに強風が流入してくる。）であることが知られている。このような局地風は、本解析に使用した地形因子並びに解析手法では推定不可能である。

しかし、逆に、このような特異な風の作用する測点の地形特性を調査することにより、構造物の建設点に作用する風況特性の定性的推定が可能になるものと考えられ、次節において推定精度の悪い測点に注目し、地形特性と強風特性に関して若干の考察を加える。

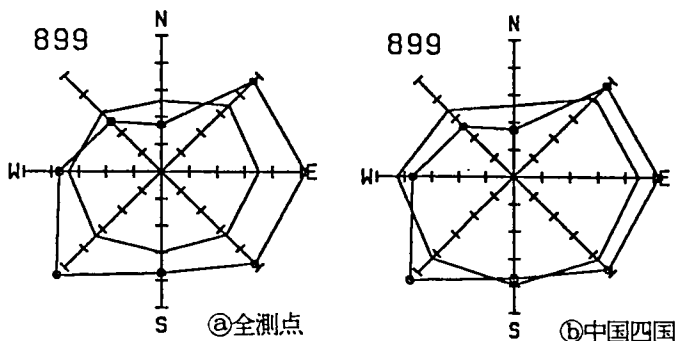


図 3-14 室戸岬における観測値と推定値

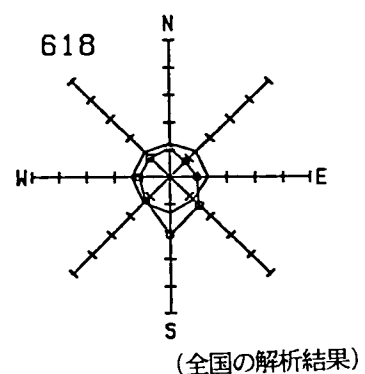


図 3-15 松本における観測値と推定値

3-4 推定精度の悪い測点における強風特性と地形形状

全国と地域別に分割した両解析において、推定値が共に観測値の25%以下（過小評価）及び、50%以上（過大評価）となる測点の風向と観測値を表3-9にまとめ、図3-16には、これらの観測点における全国を対象とした場合の推定値と観測値（実線が解析結果、○印が観測値）を各測点毎に8風向について示した。

縮尺5万分の1の地形図、並びに、都道府県図を用いて各測点近傍の局所的地形特性及びメソスケールの地形特性を調査し、回帰式で説明できない風速と地形特性について検討を加えた。

まず、推定値が観測値より、小さくなる過小評価点について考察を加える。

局地風と関係がある測点として、雄武(SW、おろし風)、酒田(SE、だし風)、松本(S、おろし風)等が挙げられる。また、比較的大規模な地形（メソスケール）の影響を受けている地点として、盛岡S、奈良S（平野（北上川沿い）、盆地の拡がり方向に一致）、熊谷SE（関東平野の山間部への拡がり方向または、山地の平野への張り出し方向と一致）、岐阜・名古屋SE（伊勢湾周辺の地形と台風の位置・経路の相互作用と考えられるがさらに調査する必要がある。）等が明らかとなった。さらに、測点周辺の局所的地形による増速効果の影響と考えられる地点として、相川NW、枕崎SE（谷状地形（扇状地形）による収束効果）、河口湖SE、NW、（切通し状地形における増速効果）及び、三宅島NE（地形模型実験³⁻⁶⁾によると、図3-17に示すように北西の風向では他風向より強い風が作用しており、観測点周辺の局所地形が大きく関与しているものと考えられる。）等が挙げられる。また、測点によっては、局所的な地形とメソスケールの地形特性の両者または、そのどちらかの影響と考えられる場合（宇和島W（半径20kmの地形を考慮すると入江と見なせる。また、約3km上流に300mの高さの島が存在し、この島を迂回した流れが周囲の山によって拡散できずに収束する。）、宮崎SE（15～30km南の山を迂回する流れ、または、2～7km南の丘陵地を迂回する流れ）もある。さらに、強風の発生頻度も併せて考慮すると、図3-18に示す鳥取における風向NWのように台風等の影響によって、24年間でただ一度、他の年と比較して非常に強い風が作用することに起因して、本解析結果が観測値と大幅に異なっている測点（豊岡S、日田NW、熊本W、阿久根W、枕崎NE等）もある。しかし、これらの強風も、地形と台風の相互作用によって生じることが予想され、この点についてもより詳細に検討する必要がある。

また、推定値が観測値より大きい過大評価点については、地形図を眺めてみてもその理

由が判明しない測点（例えば、津NE（約1km下流側に約40mの高さの丘が存在するものの上流側は約1kmで海に面している。）、神戸SE等）も数多く存在しているが、局所地形が正確に判断されないことに起因する測点（小名浜NE、E、測点のすぐ東側に、岬状の地形が南北方向に存在し、東寄りの風向では、測点は山の後流に位置し弱風となるが、回帰式では、岬の背後に広がる海を同時に評価することとなり、過大評価となっている。この場合、地形因子として用いる海度の定義に問題があることが明らかであり、得られた風速を局所地形を考慮して再評価する必要があるものと考えられる。なお、このような現象は相川SW、境N、勝浦E、SE等においても生じている。）も多数存在する。

表3-9 推定精度の悪い測点の風向と最大風速

No.	地名	過小	過大	No.	地名	過小	過大
402	北見枝幸		S 8.2m/s	740	西郷		SE 10.2m/s
405	雄武	SW 23.7m/s	S 8.0	742	境		N 9.8
409	網走		SE 9.3	746	鳥取	NW 29.2m/s	
426	浦河	W 30.0	N 7.2	747	豊岡	S 18.2	E 7.5
570	若松		NE 5.7	755	浜田		E 9.0
			SW 7.2	766	呉	NE 25.5	
581	八戸		S 8.2	767	福山		N 7.7
584	盛岡	S 20.5					SE 8.2
		W 19.7					SE 8.5
587	酒田	NW 28.5	NE 8.0	770	神戸	NE 27.0	
		SE 21.6				S 30.0	
588	山形		NE 7.2	776	洲本		E 13.2
590	仙台		E 10.4	780	奈良	S 23.1	
597	白河	NW 22.3	E 7.0	805	平戸		E 7.1
		S 20.2		812	佐世保	NE 23.3	SE 7.3
598	小名浜		NE 11.0	814	日田	NW 17.7	
			E 9.8	819	熊本	W 25.7	
600	輪島		SE 8.3	823	阿久根	W 33.7	
602	相川	NW 30.5	SW 9.7	830	宮崎	SE 29.2	
606	伏木		E 8.0	831	杵崎	NE 27.8	
607	富山		E 7.2			SE 37.5	
			NW 9.4	835	油津	N 29.0	
610	長野		SE 7.0	838	牛深	SE 31.0	N 11.2
			S 4.8	891	高松	SE 17.8	
618	松本	S 21.0	NE 8.3	892	宇和島	W 32.7	
624	前橋		S 7.3	893	高知	E 29.2	
626	熊谷	SE 22.8	SW 7.2	895	徳島	SE 35.8	
629	水戸	N 28.3		897	宿毛	SE 28.8	
		S 18.8				NW 25.7	
631	敦賀		E 5.7				
632	岐阜	SE 23.3					
636	名古屋	SE 26.3					
638	甲府	NW 19.8					
640	河口湖	SE 22.0					
		NW 21.3					
651	津		NE 8.4				
653	伊良湖	SE 31.7					
		S 30.3					
		W 27.2					
674	勝浦		E 8.2				
			SE 12.5				
677	三宅島	NE 34.2					
690	日光		S 5.7				

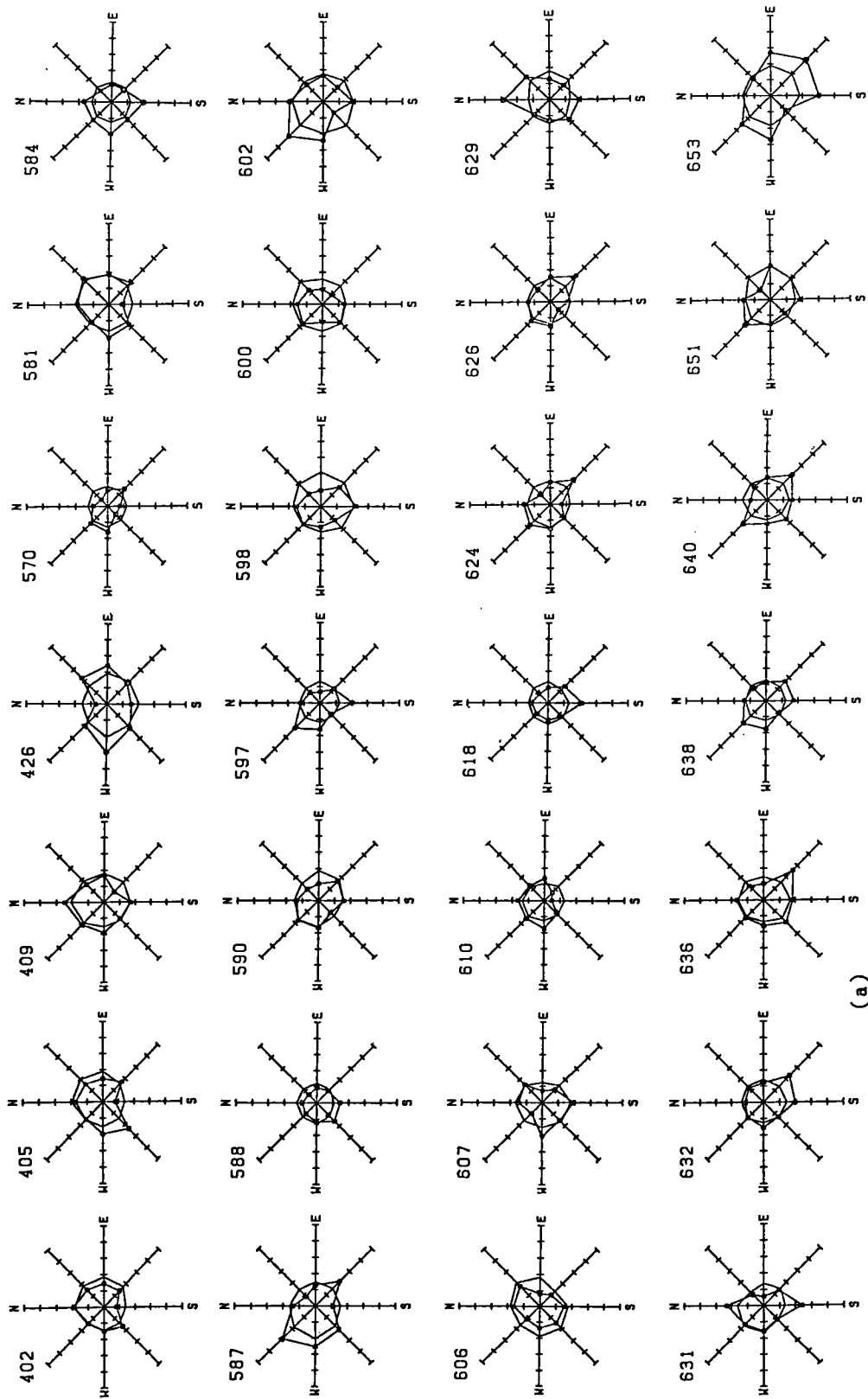
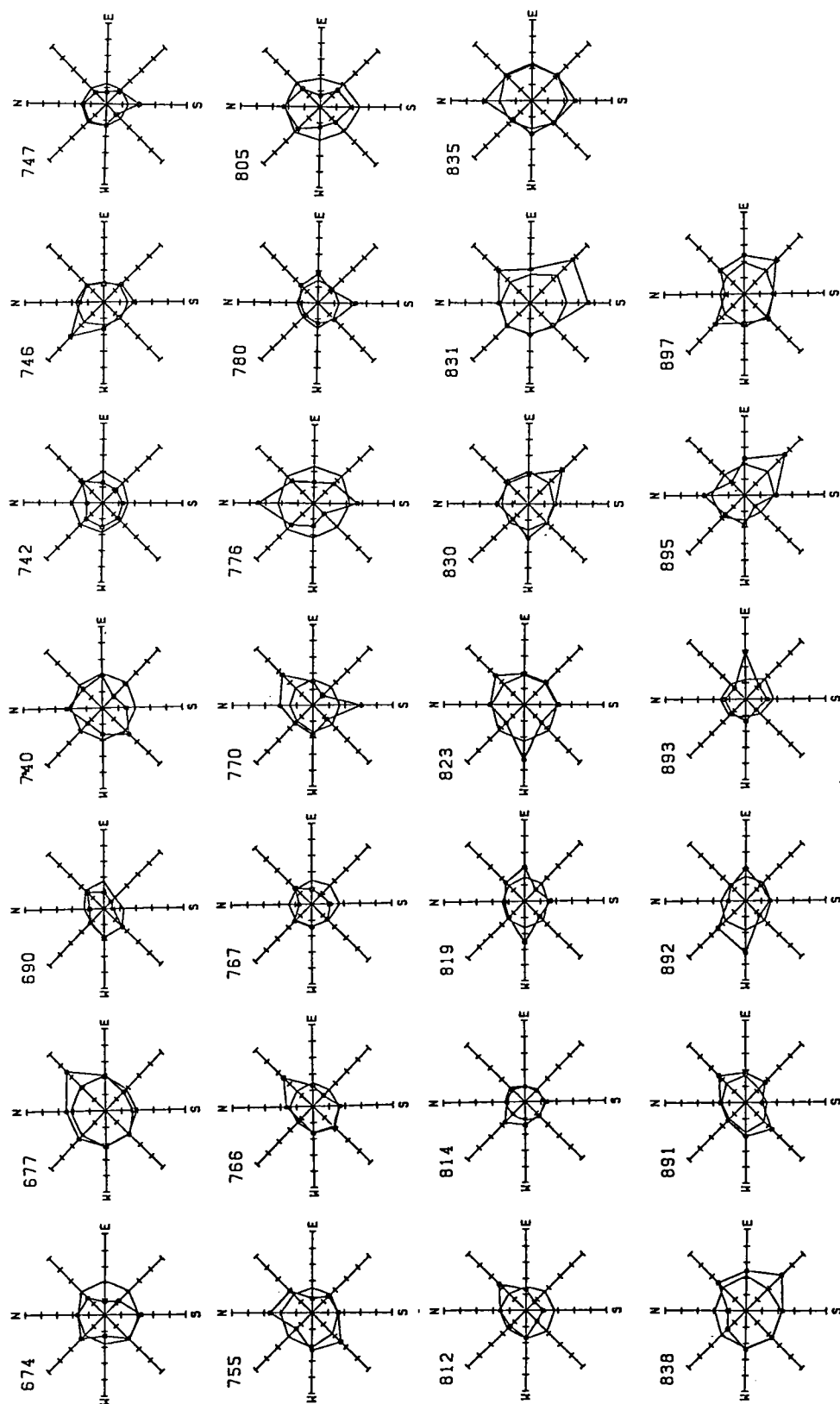


図 3-16 推定精度の悪い測点の観測値と推定値



(b)

図 3-16 推定精度の悪い測点の観測値と推定値

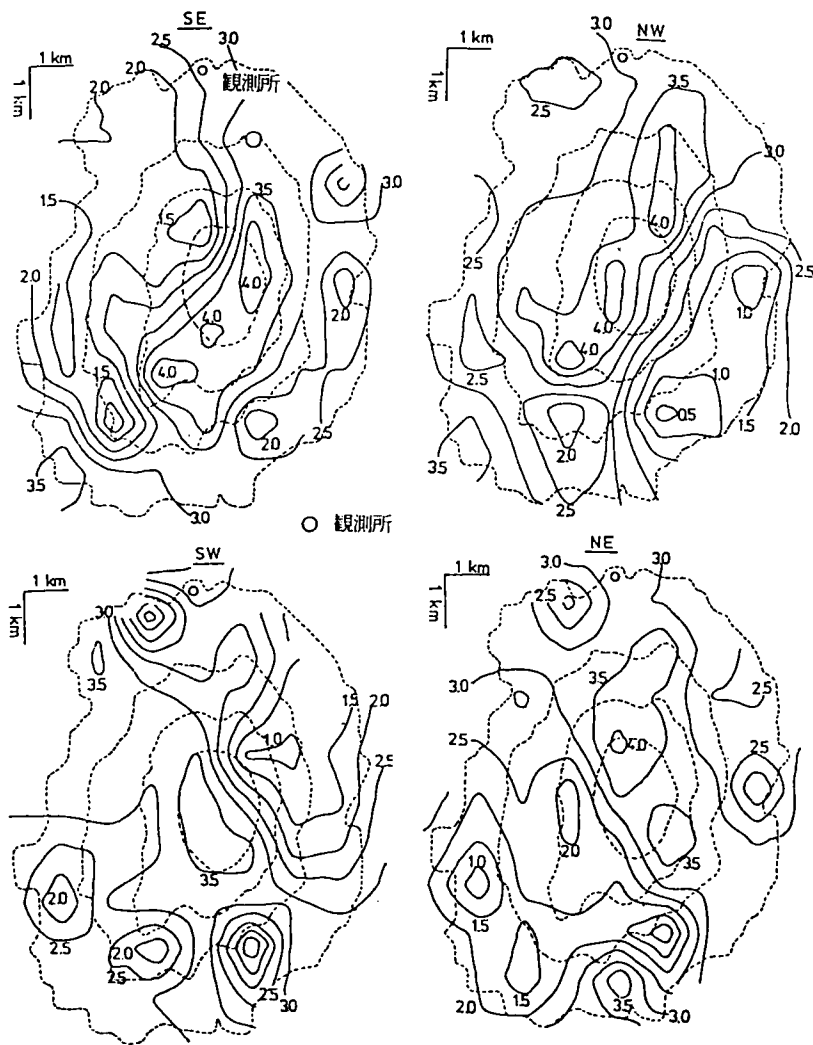


図3-17 三宅島における風洞実験値³⁻⁴⁾

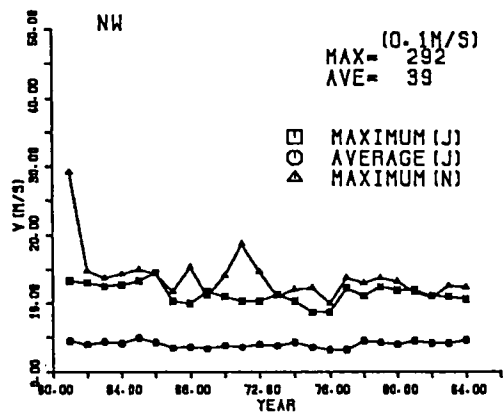


図3-18 鳥取における24年間の年最大風速 (NW)

3-5 結言

本章においては、気象官署における24年間の風向風速データより抽出した風向別風速を方位別に抽出した地形因子を用いて推定することによって、風況を支配する地形因子（ミクロ・メソスケール）を明らかにすることを目的とするものであり、本章で得られた結果並びに今後の課題を要約すると以下のものである。

- ①最大風速と平均風速の推定結果の比較より、両風速とも類似した地形因子と相関が強いこと、また、若干平均風速の推定値の重相関係数が大きくなり、地形特性とより密接な関係があることが判明した。
- ②全国の風向別最大風速を一律に評価することは、本解析に用いた地形因子のみでは不十分であるが、推定値が観測値と大きく異なる測点を抽出し、過大・過小評価測点についてそれぞれ2段階推定を施すとかなりの精度で推定が可能となり、推定値と観測値が大きく異なる測点間には、共通の地形特性が存在するものと考えられるが、その共通的特性は未だ判明しておらず今後の検討課題として残されている。
- ③本研究で新たに提案した地形因子‘丘度’は、有効な局所的地形因子であることが示され、海度、起伏度等も重要な因子であることが明らかとなった。また、解析対象地域を限定すると、方位毎の地形特性がより正確に反映できることに起因して推定精度が向上するが、複雑な地形を示す内陸部の測点を対象とすると逆に重相関係数は低下し、地形因子の抽出方法をさらに検討する必要がある。
- ④推定精度の悪い測点について、個別に地形特性と風況特性の対応を検討した結果、両者の一致しない主たる要因として、局所地形が正確に反映されていないこと、大規模な地形特性が評価できていないこと、及び、両者とも評価できていないこと等が考えられ、局所的並びに比較的大規模な地形の風速に及ぼす効果を具体的に評価することが重要であると考えられる。

そこで、次章において、我国の主たる強風の発生原因である台風に注目し、局所的並びに比較的大規模な地形と強風の対応関係を調査検討し、第5章以降の各章において、局所的な地形の風況特性に及ぼす影響を検討する。

第4章 西日本各地の台風による強風特性

4-1 概説

構造物等の耐風設計を行う場合、基本風速および設計風速の設定が重要な問題となる。

一般に、我国における基本風速の推定は、建設地点の風を参考にするとか、建設地点の風のデータと近隣気象官署のデータの相関性をもとに、気象官署のデータを用いて統計処理（極値分布理論）を行い建設地点の地形特性等を加味して決定する方法が用いられている。しかし、年最大風速観測結果が統計処理にうまく適応しない場合（例えば、大阪における室戸台風、ジェーン台風、および、第二室戸台風）も存在している。⁴⁻¹⁾ また、得られた年最大風速は季節風、低気圧、前線の通過等台風以外の要因も存在しているが、とりわけ、我国は台風常襲地帯であり、我国の大部分の気象官署の年最大風速は台風によって生じていること⁴⁻²⁾、及び、前章にも示されたように台風の襲来頻度並びにその強さ等によって、観測される年最大風速が大きく変化すること等を考慮すると、台風による強風特性を把握し、構造物の耐風設計に反映させることが必要と考えられる。そして、松本・白石ら⁴⁻³⁾は、風向別強風の極値分布から推定された風速再現期待値と短期間の観測記録による風向別Weibull分布からの風速再現期待値（Gomes & Vickeryの方法⁴⁻⁴⁾）の比で定義された台風係数を導入することによって、橋梁架設地点における短期間の自然風観測記録を用いて、橋梁の耐風安定性を議論している。

また、我国と同様に熱帯性低気圧（台風、ハリケーン、サイクロン等）の影響を受ける国々（東南アジア諸国、米国南東部、中米諸国、インド、オーストラリアの一部等）のうち米国およびオーストラリアの構造物の耐風設計の進め方は、我国にも参考になると思われる。米国、オーストラリアともに、基本風速のマップ図を年最大風速値より統計処理することによって作成し、米国は、ハワイ諸島、カリブ海域等台風およびハリケーン常襲地帯は特別地域とするとともに、ハリケーンの影響を受けるフロリダ半島付近では非常に高い基本風速値を与えている。一方、オーストラリアでは、サイクロンの影響を受けやすい地域を設定し（南緯27°以北、海岸線より50km以内）、基本風速の値をさらに推定値より1.15倍すると規定している。⁴⁻⁵⁾

台風に関しては、光田ら⁴⁻⁶⁾及び牧野ら⁴⁻⁷⁾が、台風構造に着目した標準化台風に関する研究を行っている。これらの研究によって上層風の推定が可能となるが、地表面付近の風は、複雑な地形の影響によって上層風との相関性から精度良く評価することは極めて

難しく、台風シミュレーションにおける問題点として残されている。

本章では、台風の位置、経路によって、各地点に作用する風況特性（風向及び風速）を明らかにし、各地点のスケールの小さい局所的地形特性または非常に大規模な地形特性と台風の位置、経路の相互作用による各地点における増速効果を明らかにすることを目的とするものである。なお、本研究に用いたデータは西日本各地の気象官署の1964年（昭和39年）より1978年（昭和53年）までの15年間の3時間毎の毎正時10分前より毎正時までの10分間平均風速とその風向である。そして、15年間に発生した429個の台風（最大平均風速17.2m/s以上）の台風期間（熱帯性低気圧が最大平均風速17.2m/s以上の勢力を有している期間、台風が北半球に存在している期間）を対象として各地点における5m/s毎の風速ランク別風向特性および16方位別平均風速特性を調査するとともに、各地点における強風時の台風中心位置・経路と風向・風速の関係を検討した。また、地点によっては強風時の風向に際だった偏り（卓越風向）が存在しており、このような地点に関しては卓越風向の強風が発現したときの台風中心位置の調査も併せて行った。⁴⁻⁸⁾

4-2 台風期間中の強風特性

解析データは3時間ピッチの平均風速、平均風向であり、台風の及ぼす影響を端的に表わす最大平均風速値、最大瞬間風速値は押えられていないが、各地点の強風特性としてここでは平均風速と風速ランク別風向発生頻度を調査した。

図4-1は、台風期間（熱帯性低気圧の最大平均風速が17.2m/s以上である期間）中のデータ（13,511個、15年間の全データは1日につき8個、合計43,832個）を用いて求めた西日本各地点の平均風速値である。また、図4-2は15年間の全データによる平均風速値である。

本解析対象地点の中で、瀬戸内海中央部（福山、岡山等）および盆地（京都、奈良、日田、人吉）が弱風地域であり、平野部の中でも外洋に面した地点（油津、阿久根等）、外洋と内海の境界地点（下関、徳島等）、および神戸、大阪、洲本といった大阪湾に面した地点で平均風速が高くなっている。また、台風期間中の平均風速値（図4-1）と全データの平均値（図4-2）に大きな差はないが、ここに設定した台風期間は直接台風の影響下にある期間ではなく、北半球に台風が存在している期間であること、並びに、台風期

間が主として夏期から秋期（7、8、9、10月）に集中していることより、冬期の季節風が比較的強い地点（萩、浜田、鳥取、多度津、等）において、全データを用いた平均風速値が高い値となっている。

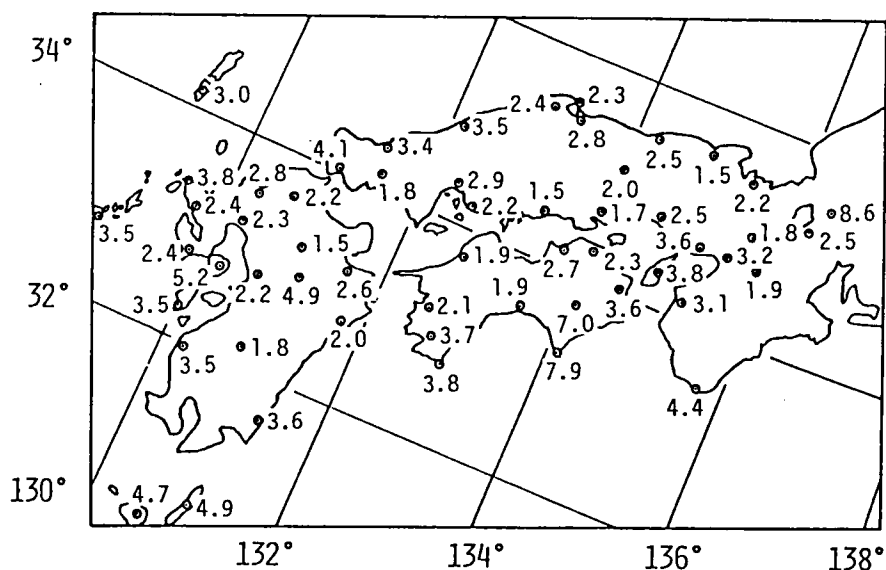


図4-1 台風期間中のデータによる西日本各地点の平均風速

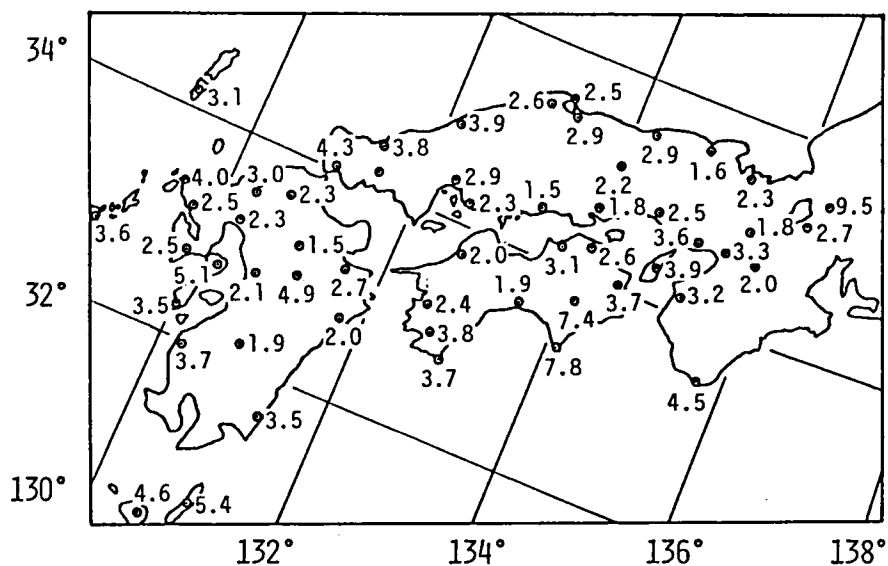


図4-2 15年間の全データによる西日本各地点の平均風速

台風期間中のデータを用いて求めた西日本各地の風速ランク別風配図の一例として、下関、神戸、洲本、室戸岬、岡山の結果をそれぞれ図4-3～図4-7に示す。

図4-3に示した下関では、東寄りの風と西寄りの風（西北西の風）の占める割合が非常に大きいことが明らかである。さらに、平均風速15m/s以上の強風に関しては、東寄りの風に集中していることが認められる。

図4-4に示した神戸においては、平均風速20m/s以上の強風は、北・東北東・南南西の3方向で観測されているが、10m/s以上の風の出現頻度は、東北東の風（神戸付近の海岸線及び六甲山系に平行な風）が非常に卓越している。

図4-5の洲本では、全体的に北寄りの風と南寄りの風が多く、平均風速10m/s以上の強風については、北寄りの風と南寄りの風が卓越している。また、北寄りおよび南寄りの風の平均風速値も高くなっている。

室戸岬（図4-6）では、全体として北東の風と西寄りの風の発現頻度が高くなっているが、平均風速25m/s以上の強風に関しては、北西から北（ほぼ室戸岬の陸上部）を除いた全方位において観測されている。さらに、平均風速値も北寄りの風が弱くなっているものの、下関、洲本ほどの偏りはなく、太平洋に突出した地形特性に対応した強風特性を示しており、下関、洲本とは異なった特性を有している。

図4-7に示した岡山は、比較的弱風地点であり、平均風速15m/s以上の風は15年間で2度記録しただけであり、強風の作用する風向にも、下関、洲本ほど明確な卓越性は存在しない。

なお、下関における東寄りの風は、瀬戸内海から日本海へ吹き抜ける風（関門海峡周辺部に気流が収束する。）に相当し、洲本での南寄りの風は太平洋より紀伊水道を経て、大阪湾、瀬戸内海へ吹き込む風に対応し、北寄りの風は、その逆と考えられ、風向・風速特性に大規模な地形特性が影響を及ぼしている一例と考えられる。

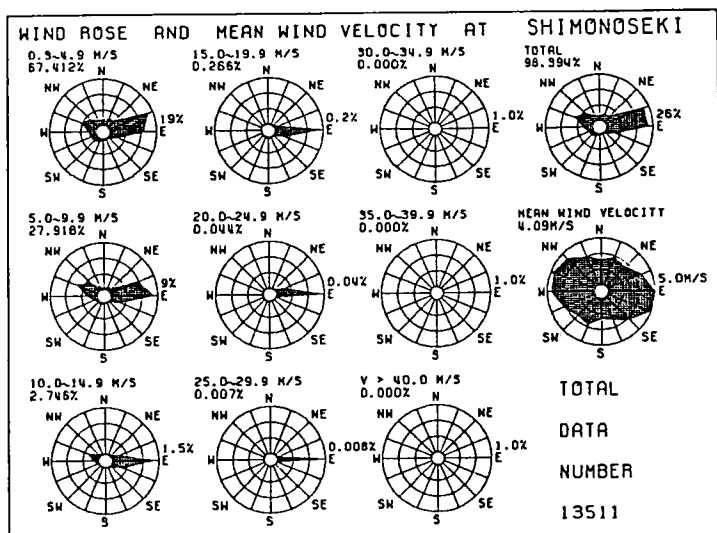


図4-3 下関における台風期間中の風速ランク別風配図

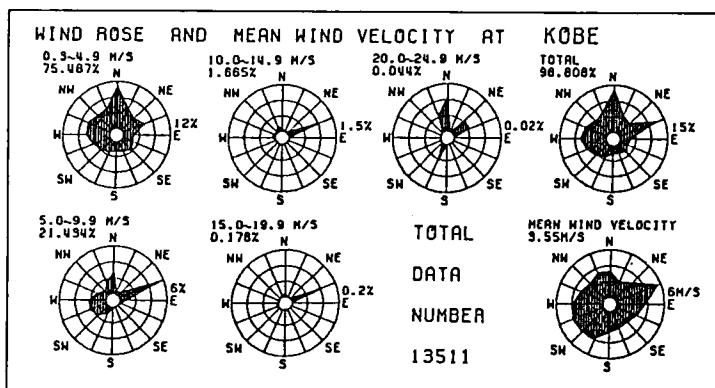


図4-4 神戸における台風期間中の風速ランク別風配図

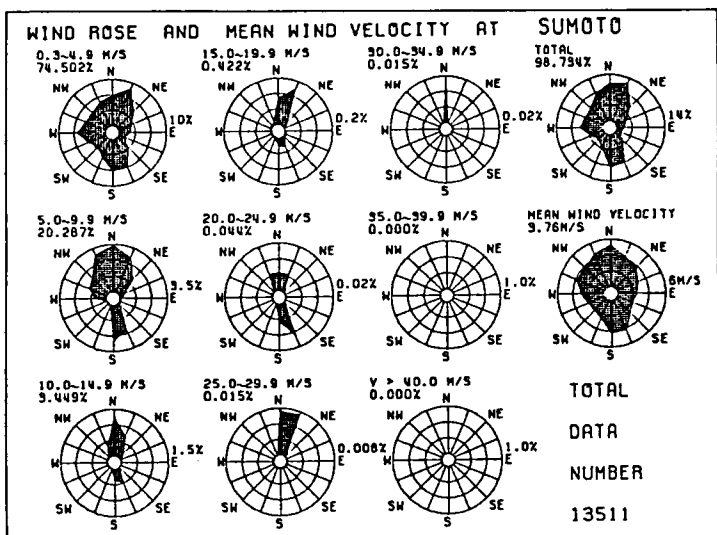


図4-5 洲本における台風期間中の風速ランク別風配図

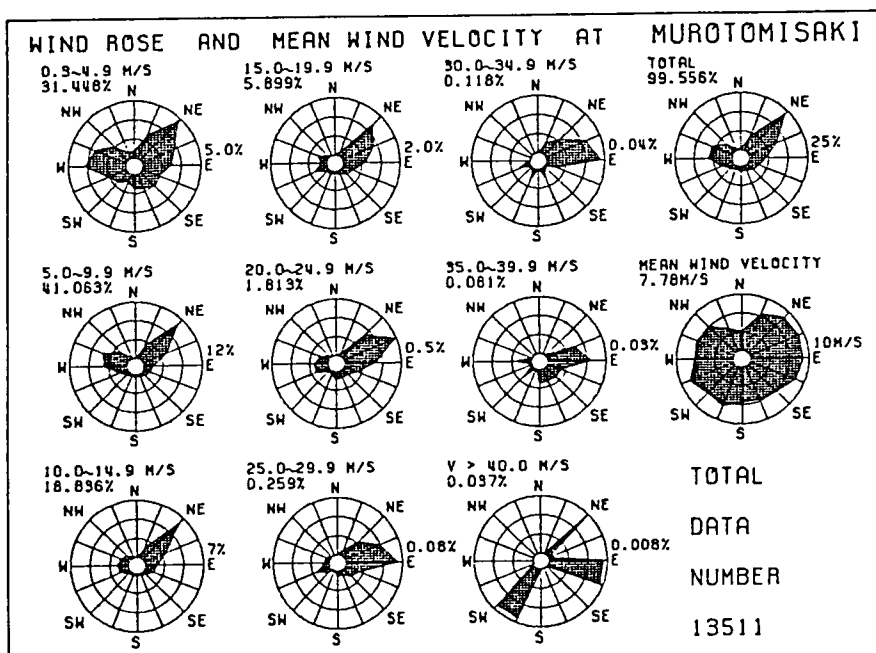


図4-6 室戸岬における台風期間中の風速ランク別風配図

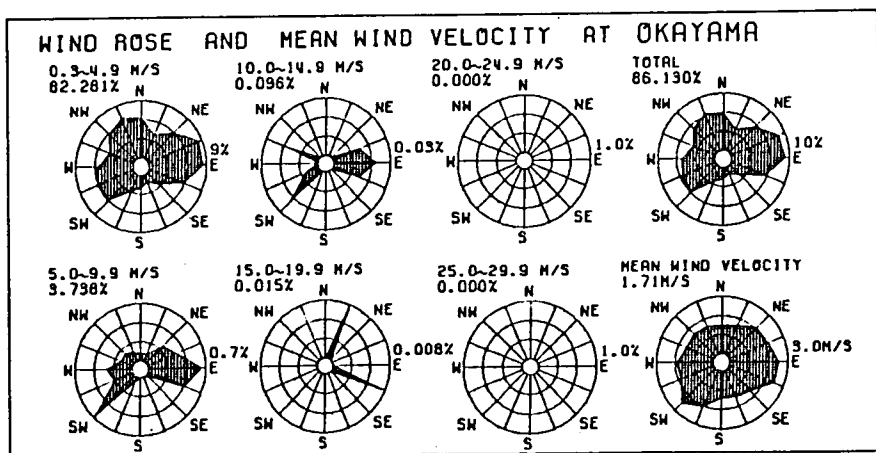


図4-7 岡山における台風期間中の風速ランク別風配図

4-3 卓越風向と台風中心位置・経路の関係

前節に示した風速ランク別風向発現頻度の調査より下関、洲本のように比較的強風時（平均風速10m/s以上）に卓越風向を有する地点の存在が明らかとなった。ここでは、台風中心位置あるいは台風の進路と卓越風向を有する強風の間係を調査し、各地点の地形特性と強風特性の間係を検討する基礎資料を得ようとするものである。

図4-8は、洲本の北寄りの風（N,NNE）と南寄りの風（S,SSE）の平均風速が、10m/s以上となった時の台風中心位置を示すものである。

図4-9は、下関において東風の平均風速が、10m/s以上を記録したときの台風の移動方向を矢印で示したものである。

洲本において北寄りの強風が作用するときの台風中心位置は紀伊半島、室戸岬沖付近より遠く南方海上まで非常に広範囲に渡って存在している。特に、台風が洲本より遠く離れた位置（南方海上等）において北寄りの強風が洲本で観測されているが、これは、台風そのものによる影響ではなく、低気圧、前線等の影響と考えられるが、台風の間接的影響も無視できないと思われる。一方、洲本の南寄りの強風では、台風が九州、中国、四国北西部、日本海に存在するとき観測されており、北寄りの風と比較すると台風中心位置のバラツキが小さくなっている。また、ここに示された台風中心位置と洲本の位置を考慮すると、太平洋から瀬戸内海へ風が吹き込み易くなっていることがよく理解される。

図4-9より下関に東風をもたらす台風の位置は、沖縄、九州、朝鮮半島沖の範囲（北緯25～35度、東経125～132度）に集中しており、下関より東に台風中心が位置するときには、東寄りの強風はほとんど観測されていない。また、台風の進路は、種々さまざまであり、下関の左側（一般に、台風中心の右側で風速がより強くなる。）を台風が通過しない場合も有る。さらに、台風の目を中心として左回りの渦を想定したとき、下関で東風となる場合も存在するが、東風が作用しないと考えられる場合も存在しており、前述のように関門海峡付近において、瀬戸内海から日本海へ風が非常に吹き抜け易くなっていることが想像される。

ここでは、洲本と下関に注目して考察を加えたが、台風による強風は、局所的な地形の影響も考慮する必要もあるが、比較的大規模な地形特性の影響も大きいことが明らかである。

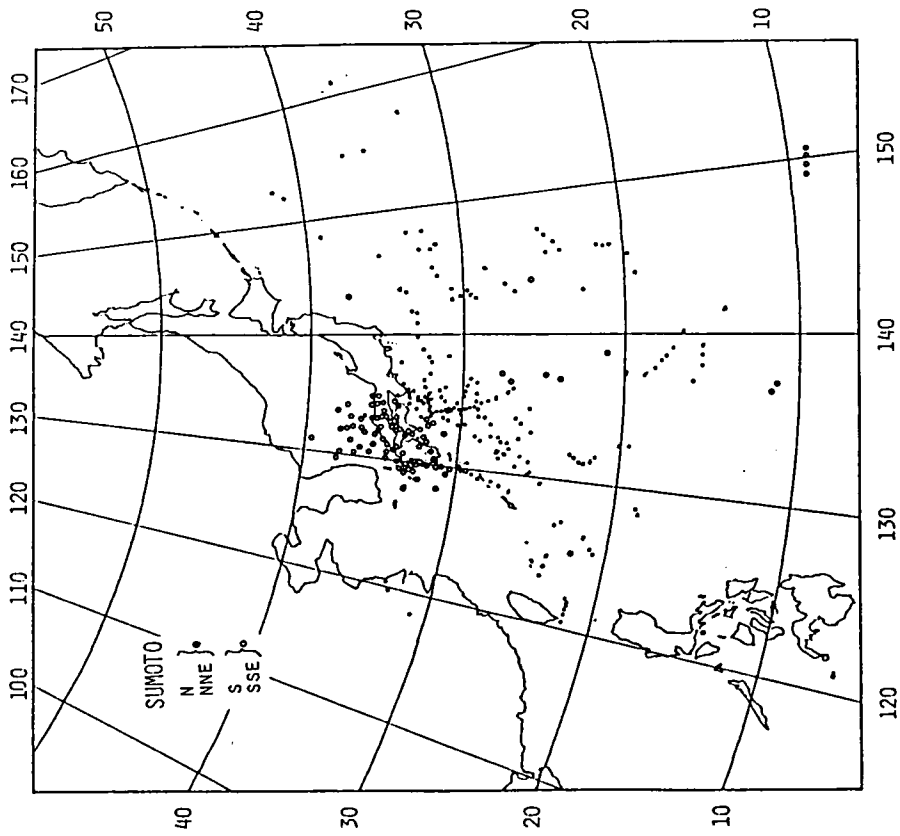


図4-8 洲本において平均風速10m/s以上の北寄りの風 (N, NNE) と南寄りの風 (S, SSE) が観測されたときの台風中心位置

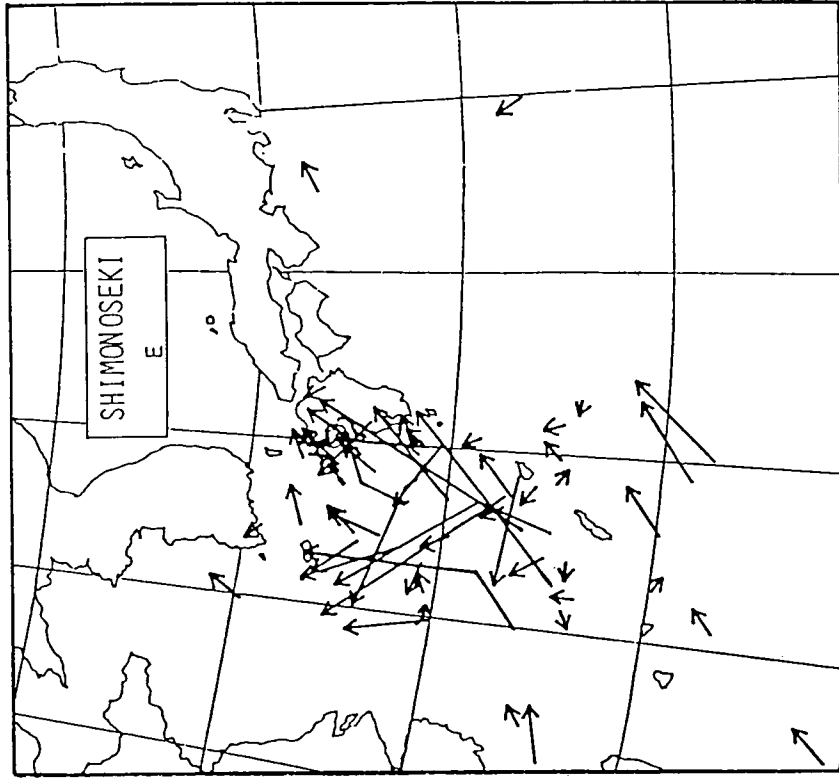


図4-9 下関において平均風速10m/s以上の東風 (E) が作用したときの台風移動方向

4-4 各地点における強風時の台風中心位置と経路

前節では卓越風向を有する洲本と下関の強風特性と台風中心位置、経路の関係を検討したがここでは、各地点において平均風速 15m/s以上（但し、松山は比較的弱風地点であり平均風速10m/s 以上）の強風が作用したときの台風中心位置を光田らの研究⁴⁻⁹⁾に使用された台風経路図上に風速ランクと風向を併せて示し、各地点の強風特性と台風中心位置、経路の関係を明らかにしようとするものである。

図4-10～図4-17は、それぞれ、下関、広島、松山、洲本、大阪、神戸、徳島において15m/s 以上の強風が作用したときの台風中心位置を示したものであるが、光田らの台風経路図は1時間ビッチで示されており、本解析対象データは3時間ビッチであるため、無印の点が多数存在しているが、無印の点が全て弱風であるということではない。

図4-10に示す下関では、前に記したように東寄りの強風が卓越しているが、下関の北に台風が位置するとき南寄りの風が作用している。また、15m/s 以上の東寄りの強風が作用するとき、台風は九州の西方より有明海、九州北部を通過し日本海へ直線的に抜けるコースに集中している。

図4-11の広島は、瀬戸内海中央部に位置するものの前出の図1に示すように比較的強風地点であり、15m/s 以上の強風は次の2つのパターンに大別できそうである。すなわち、(i) 台風が広島より北に存在（日本海を含む）するときに南寄りの風が作用する。(ii) 台風が広島より南に位置するときに北寄りの風が作用する。この強風特性は、瀬戸内海が広島周辺において北に入り込んでいることと対応しているものと考えられる。

図4-12に示した松山は比較的弱風地点であり、平均風速10m/s 以上の風を対象としているが、その傾向は広島とほぼ同様である。特に、南寄りの強風に関しては、松山から遠く離れた九州および山口県沖の日本海上に台風が抜けた直後に観測されており、ルース台風時に今治周辺において観測された強風発生特性（発生時の台風中心位置および風向）と風速規模が異なるものの類似性が認められる。

洲本（図4-13）でも広島と類似傾向を有し、洲本より北（中国地方、日本海）に台風が存在するときに南寄りの強風、逆に洲本より南（紀伊半島および四国沖）に台風が位置するとき北寄りの強風が作用している。両者ともに洲本からかなり遠く離れて台風が存在する場合にも強風が作用し、特に、20m/s を越える南寄りの強風は、台風が呉、川之江付近等洲本と非常に離れた位置に存在するときにも観測されている。また、北寄りの強風も紀伊半島沖に台風が位置するとき非常に強い風（30m/s 以上）が作用している。こ

これらの現象は、洲本をとりまく大規模な地形特性（紀伊半島、四国、淡路島、瀬戸内海、大阪湾、および、六甲山系）と台風の経路、位置が相互に複雑に影響することに起因しているものと考えられる。

大阪（図4-14）は、洲本と本質的に類似した傾向を有しているが風速規模および強風時の台風中心位置の範囲は洲本より狭まっている。また大阪では、過去に室戸台風、第二室戸台風およびジェーン台風が大阪湾を通過し、本州上陸直後に南寄りの非常に強い風が観測されているが、これらの台風と類似コースを通過した台風7506号（図4-14中太線で示したもの、本州上陸時の中心気圧980mb程度）は、比較的弱い台風であり神戸には強風が作用していないものの、大阪では15m/s以上の南風が観測されており、各地点の強風特性には地形特性と台風中心位置、経路に大きく依存することが認められる。

また、神戸（図4-15）も、洲本、大阪の特性と本質的に似ているが、北寄りの六甲山系からの吹き降ろし風（六甲おろし）は、洲本では特に強い風が作用していない紀伊半島沖から伊勢湾付近に台風が位置するときに作用している。また、四国沖から紀伊水道付近に台風が存在するときは、六甲山系（または海岸線）に平行な東北東の強風が作用している点が若干洲本と異なっている。

以上の洲本、大阪、神戸の強風特性と台風中心位置、経路の関係は、大阪湾周辺の過去の台風中心位置と強風特性の調査結果⁴⁻¹⁰⁾ともよく一致している。

強風を徳島に発生させた台風中心位置（図4-16）は、徳島以西に集中し、観測された風向は南東付近に集中している。台風が四国沖、紀伊半島沖に存在するとき強風が作用している洲本、大阪、神戸の特性とは大きく異なっており、大規模な地形特性の一端が示されているものと思われる。すなわち、この徳島に、作用する南東周辺の強風は、紀伊半島を迂回する流れまたは、四国山地を迂回する流れと考えられる。



図4-10 下関において平均風速 15m/s以上の強風が作用したときの
台風中心位置、経路と強風特性（風速レベル、風向）

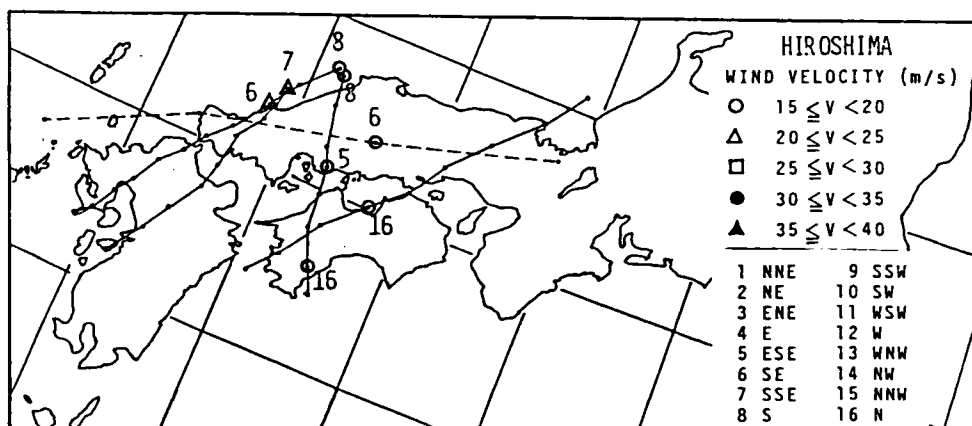


図4-11 広島において平均風速 15m/s以上の強風が作用したときの
台風中心位置、経路と強風特性（風速レベル、風向）

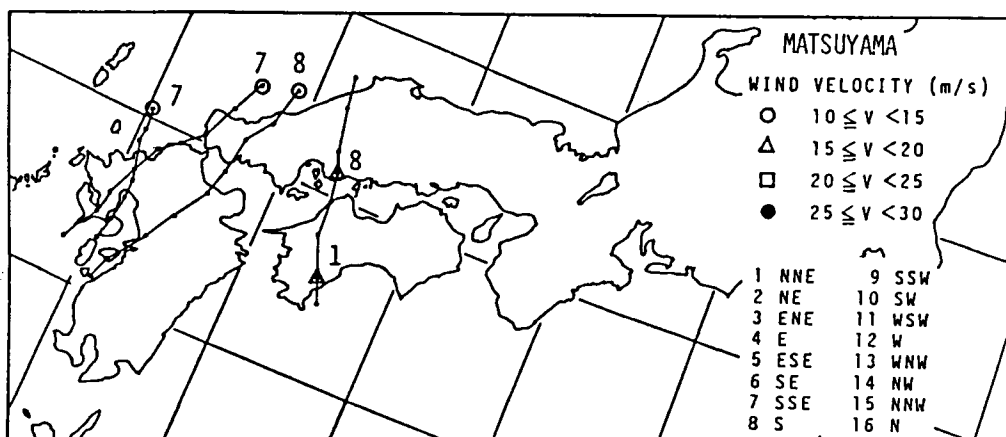


図4-12 松山において平均風速 10m/s以上の強風が作用したときの
台風中心位置、経路と強風特性（風速レベル、風向）

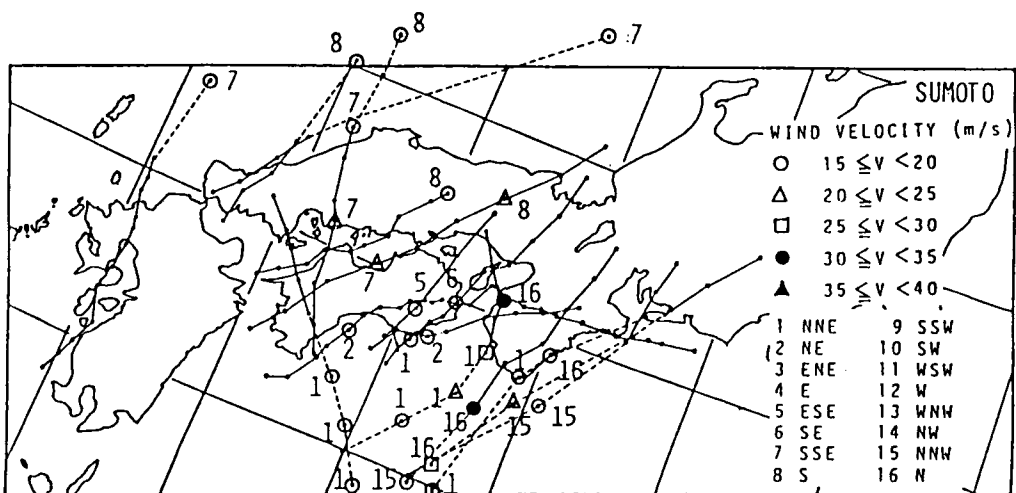


図4-13 洲本において平均風速 15m/s以上の強風が作用したときの
台風中心位置、経路と強風特性（風速レベル、風向）

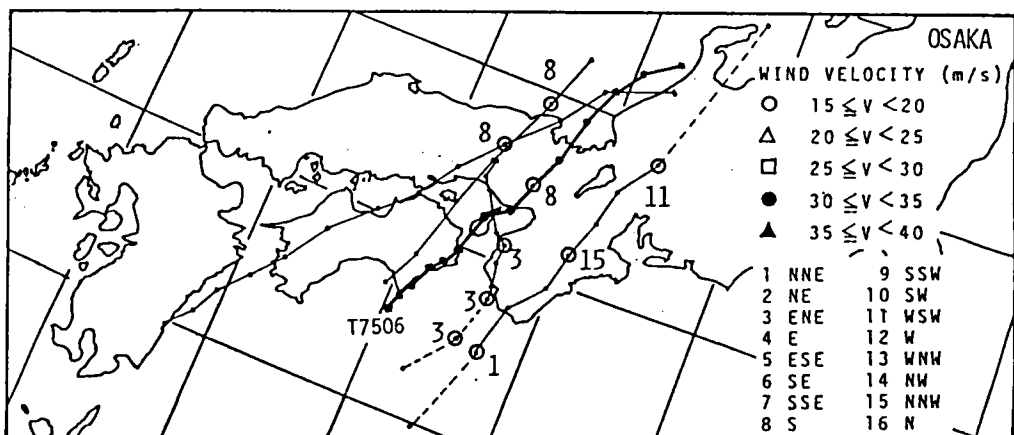


図4-14 大阪において平均風速 15m/s以上の強風が作用したときの
台風中心位置、経路と強風特性（風速レベル、風向）

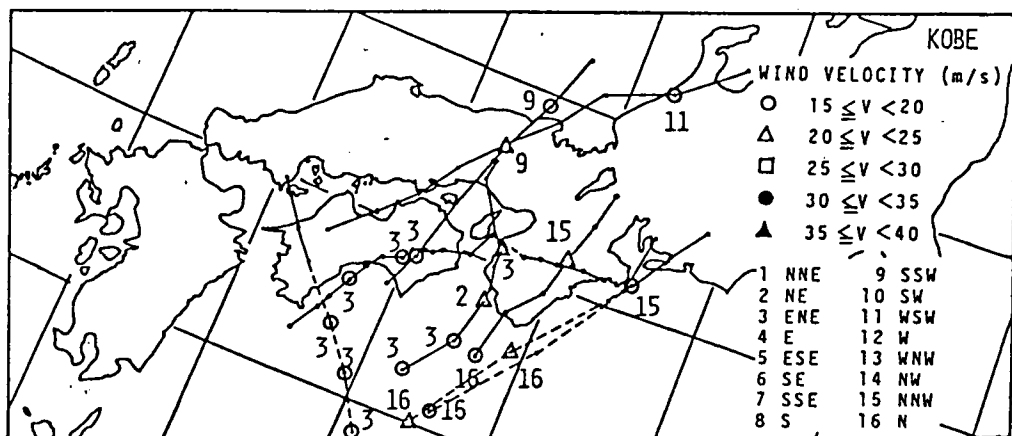


図4-15 神戸において平均風速 15m/s以上の強風が作用したときの
台風中心位置、経路と強風特性（風速レベル、風向）

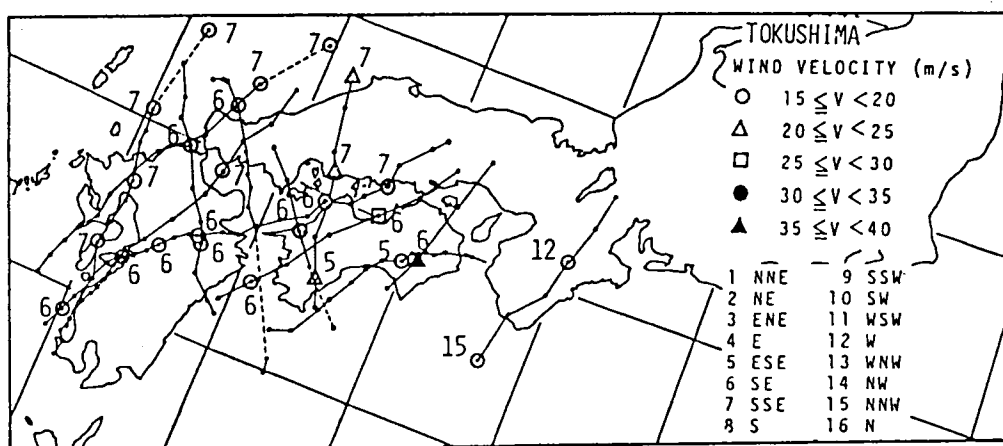


図4-16 徳島において平均風速 15m/s以上の強風が作用したときの
台風中心位置、経路と強風特性（風速レベル、風向）

4-5 結言

本研究の解析対象データは3時間ピッチと非常に粗く、各台風による各地点の最大平均風速、最大瞬間風速およびこれら最大風速の発現時の台風中心位置は、把握されていないものの各地点の台風中心位置、経路と強風特性の関係が定性的に明らかとなった。たとえば、各地点の台風期間中の強風特性として瀬戸内海中央部（松山、福山、岡山等）および盆地（京都、奈良等）では、比較的弱風地点となっているが、一方、瀬戸内海と外洋の境界付近（下関、徳島、洲本、和歌山等）では、瀬戸内海へ吹き込む風あるいは逆に外洋へ吹き抜ける風が卓越するとともに、この卓越風向の強風の発現頻度が高くなり、比較的強風地点となっている。しかし、各地点によってその卓越風向の強風あるいは卓越風向以外の強風の作用は台風経路、位置に大きく左右されるとともに各地点付近の局所的地形特性のみならず大規模な地形特性にも大きく依存していることが判明した。

最後に、非常にランダムな性質を有する台風による強風を耐風設計に積極的に反映させるため、過去の超大型台風（室戸台風、伊勢湾台風等）のデータおよびより細かい時間間隔のデータの収集に努め、各地点の強風特性に及ぼす台風の位置、経路および地形特性をより詳細に検討する必要があると考えられる。

第5章 海峡周辺部における風況特性

5-1 概説

我国は台風の常襲地域に位置し、長大橋梁の安全性を支配する最大要因として、風荷重が挙げられる。したがって、長大橋梁の建設が予定される海峡周辺の風況特性は、現地観測並びに風洞実験等によって調査され、橋梁の耐風設計に反映されている。⁵⁻¹⁻⁵⁻³⁾

一般に、海峡部は、気流の収束により強風域となることが良く知られているが、海峡部に作用する風は、大規模な地形特性（メソスケール）並びに周辺部の局所的な地形特性によって、異なった特性を示すことが知られており、さらに、作用する風向の変化に対しても風況特性が大きく変化することもある。

そこで、本章においては、本州四国連絡橋児島・坂出ルート周辺部及び大鳴門橋周辺部を対象として、海峡周辺部における風況特性を縮尺地形模型を用いた風洞実験・現地強風観測調査等に基づいて検討することによって、海峡部の風況特性に及ぼす局所地形の影響を明らかにしようとするものである。

また、本州四国連絡橋児島・坂出ルート周辺部を対象とした縮尺地形模型実験については、本州四国連絡橋公団が実施した本ルート周辺の長期気象観測データ⁵⁻⁴⁾、あるいは工事期間中に実施したルート上での短期強風観測結果⁵⁻⁵⁾等を参照し、現地観測による実測データを用いて風洞実験の妥当性の検証も行なった。

5-2 大鳴門橋周辺部の風況特性に及ぼす局所地形の影響

鳴門海峡は、気流の収束による強風が作用することが良く知られている。

まず、門崎No.4測点（淡路島の南端部、関西電力送電鉄塔、地上69m、海面上110m）の風速ランク別出現時間、出現回数、継続時間について、1972年～1983年の12年間平均の年間値を表5-1に示し、表5-2⁵⁻⁶⁾には、1972年～1975年について、各月毎の調査結果を示している。季節風に起因した10m/s以上の強風の発現頻度が冬期に非常に高くなっていること及び20m/s、25m/s以上の強風は季節を問わず年間を通じて生じる可能性があり、特に、強風地点であることが推察できる。

図5-1は、門崎No.4測点における1972年～1976年までの5年間の3時間毎の毎正時10分前より毎生時の10分間平均風速、10分間平均風向を用いて求めた風速ランク別風向発現頻度である。なお、各図の左上に風速レベルを、右上に各風速レベルの全体に対する出現頻度を、左下には各図の最大円の座標値を示しており、右下の図は風向別平均風速値を示したものである。門崎No.4では、5m/s以上の風は主として、岬に直交する風向が卓越することが明らかである。

図5-2は、4P塔頂、スパン中央、3P塔頂、門崎No.4、及び門崎高架橋3P・7P上に設置された風向風速計出力記録の1982年8月～1984年10月の間に門崎No.4測点で平均風速が20m/s以上となった期間に前後1時間を加えた期間を解析対象として求めた風配図である。門崎No.4測点並びに門崎高架橋上の測点は、図5-1と同様に岬に直交する風向が卓越するが、鳴門海峡上の各点は若干卓越風向が異なり、南寄りの風はやや反時計方向に偏り、北寄りの風も同様に西側に偏っており、門崎No.4測点並びに門崎高架橋上の測点は、岬の影響を受けていることが予想される。

図5-3③、④は、それぞれ昭和60年1月28日、29日の現地観測結果を淡路島側側径間1/3点の値を基準として無次元化した風速値を各地点の平均風向に示したものである。

平均風速が10m/s～15m/sと比較的低風速であったため、各地点の風速値に多少バラツキがあるものの、四国側より門崎岬側の測点における風速が若干高くなっており、光田らの風洞実験結果並びに現地観測結果⁵⁻⁷⁾と一致している。また、門崎岬先端周辺の各測点の風向風速分布が両図で異っており、③図では、門崎岬を、回り込むような流れが存在し、④図では、なめらかに海峡部を流れ去るパターンとなっている。③図に示される流れのパターンが上述の門崎No.4測点と他測点の卓越風向が異なる原因の一つとも考えられる。また、V字谷の地形上に架設された亀浦高架橋上の8P測点の計測値は、局所的な地

形の絞込みの影響によって非常に大きくなっている。これらの点については、それぞれ第8章（半島状地形）及び第7章（谷状地形）において詳細に検討する。

図5-4に、門崎No.4、3P、4P塔頂、スパン中央及び門崎高架橋3P、7Pにおける突風率を示した。門崎No.4、3P、4P塔頂では、平均風速20m/s程度で突風率が1に近い非常に定常な気流（低気圧が四国の北に存在するときの南寄りの風S～SE）も存在しているが、台風による30m/s以上の強風は約1.2程度に収束している。また、大鳴門橋のスパン中央部では、前述の3測点と類似した傾向が示されているが、突風率の最低値がやや大きくなり、また各風速においてバラツキも大きくなっている。

また、北西の強風が作用するときの門崎高架橋上の測点では、岬の後流内に位置することとなり、図5-5に示すように風速・風向・鉛直傾斜角とも非常に変動が大きくなる。

したがって、突風率も大きく、乱れた気流に対する注意が必要であろう。

表5-3は、各測点間の風速比(C)、相関係数(R)、標準偏差(SVC)を全データ、主風向（北寄りの風と南寄りの風）別に示したものであり、各測点間について、強風発生要因別にまとめたものが表5-4である。なお、表5-3に示す記号T、2L、L、Wは、それぞれ、台風、2つ玉低気圧、低気圧または低気圧に伴う前線による強風、及び冬期季節風を示している。各測点間の相関係数は、0.8～0.9と比較的高い値を示しており、任意点の値を使用した各点の風速の推定は、統計的には可能である。また、海面上110mの高さの門崎No.4測点の風速値は、高さ149.4mの4P塔頂より大きく、3P塔頂と同程度であり、風速値にも若干岬の影響を受け増速していることが推察される。このような、丘状地形周辺の風況特性は、次章において検討する。また、両主塔頂上測点の風速値を比較すると、全体あるいは南寄りの風で3P塔頂が強風となり、冬期の季節風において4P塔頂の風が強くなっている。スパン中央部と各測点間の対応には、大きなバラツキが存在するものの門崎No.4、3P、4P塔頂の約8割程度を示している。しかし、高風速域における各測点の風速値を比較すると、スパン中央における風速値が高くなるケース（台風時）も存在しており、海峡における増速効果の一端が伺える。

表5-1 門崎No.4における1972～1983年の12年間の
データによる年平均強風出現状況

風 速	発生回数 (回)	総時間 (h)	割合 (%)	平均時間 (h)
10m/s 以上	227.6	1,930.3	22.0	8.5
15m/s 以上	88.8	500.5	5.7	5.6
20m/s 以上	22.5	70.1	0.8	3.1
25m/s 以上	3.4	11.8	0.1	3.5

表5-2 門崎No.4における風速ランク別の出現時間、出現回数、継続時間⁵⁻⁶⁾

場所：門崎観測所（観測高度：地上69m、面位110m、統計期間1972～1975年）

月 ランク		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年間
10m/s 以上	出現時間	29.5	22.5	20.9	20.3	21.7	11.6	14.6	11.0	8.0	9.4	16.5	24.4	210.4
	(割合) %	39.6%	33.5	28.0	28.2	29.3	16.7	20.9	15.8	11.4	12.6	23.6	35.1	23.9
	出現回数	2.4回	3.0.5	2.4	2.6	2.0.5	1.6	1.6.5	2.0.5	1.6.5	1.5.5	1.2	2.8.5	250.5
	継続時間	1.2	7	9	8	10.5	7	9	5.5	5	6	1.4	8.5	8.5
15m/s 以上	出現時間	10.0	7.0	6.7	7.5	7.3	2.7	2.8	2.3	1.4	1.7	5.0	4.8	59.2
	(割合)	13.4	10.4	8.9	10.4	9.9	3.9	3.9	3.3	1.9	2.3	7.1	6.9	6.6
	出現回数	2.7	14.5	1.2	1.8	1.0	7	3.5	5.5	2.5	3	6	10.5	119.5
	継続時間	4	5	5.5	4	7	4	8	4	6	5.5	8.5	4.5	5
20m/s 以上	出現時間	4	1.5	9	1.6	1.4	9	9	3	6	3	8	7	10.3
	(割合)	0.5	2.2	1.1	2.2	2.0	1.3	1.2	0.4	0.8	0.4	1.1	1.0	1.0
	出現回数	3.3	5.3	2.8	7.3	4.3	1.8	1.5	0.8	1.5	0.3	3.5	2.3	34.7
	継続時間	1.2	2.8	3.2	2.2	3.3	5	6	3.8	4	1.0	2.3	3	3.0
25m/s 以上	出現時間	0.3	2.8	1.7	3.9	3.8	2.8	1	0	0.5	0	0	0.3	17.1
	(割合)	0.0	0.4	0.2	0.5	0.5	0.4	0.1	0	0.1	0	0	0.0	0.2
	出現回数	0.3	1.0	0.3	1.3	0.8	1.3	0.3	0	0.5	0	0	0.3	6.1
	継続時間	1	2.8	5.7	3	4.8	2.2	3.3	0	1	0	0	1	2.8

注) 風速のランク別出現(5m/sとさみ)が30分以内の場合は出現しなかったとみなしている。

割合は、出現時間を月の総時間で除したもの。

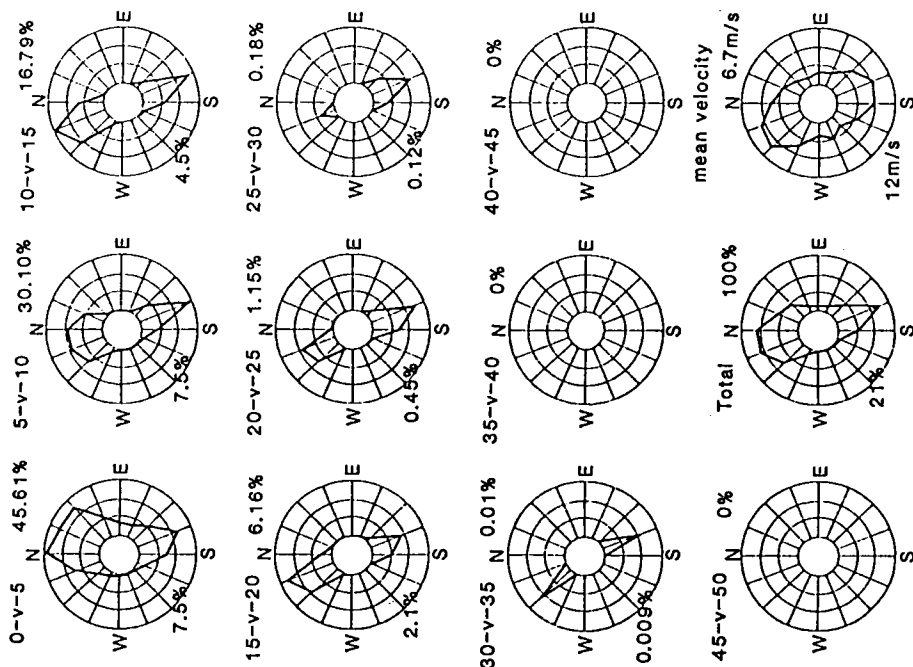


図5-1 門崎No.4における風速ラング別風配図
5年間 (1972~1976)、データ数14148 個

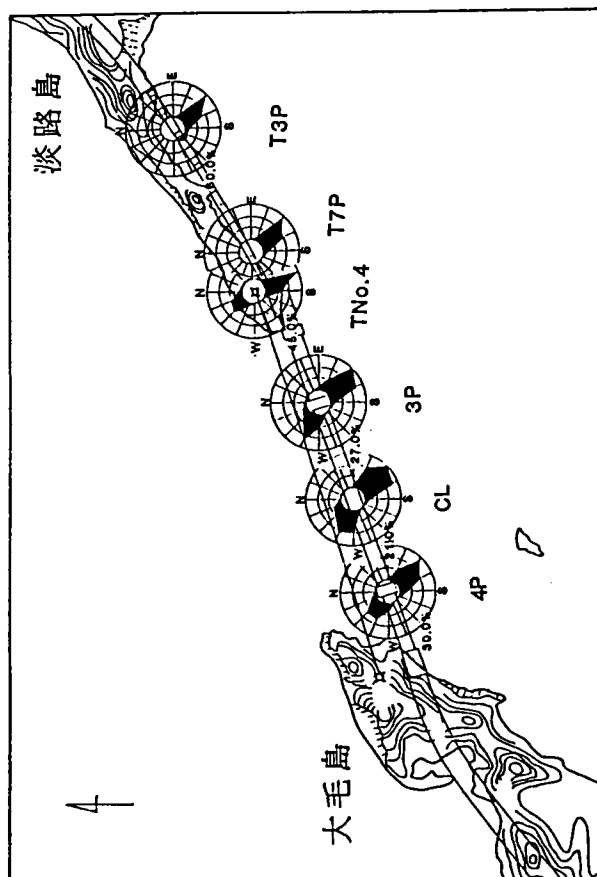


図5-2 鳴門海峡上の強風時における風向分布特性
(1982.8~1984.10)

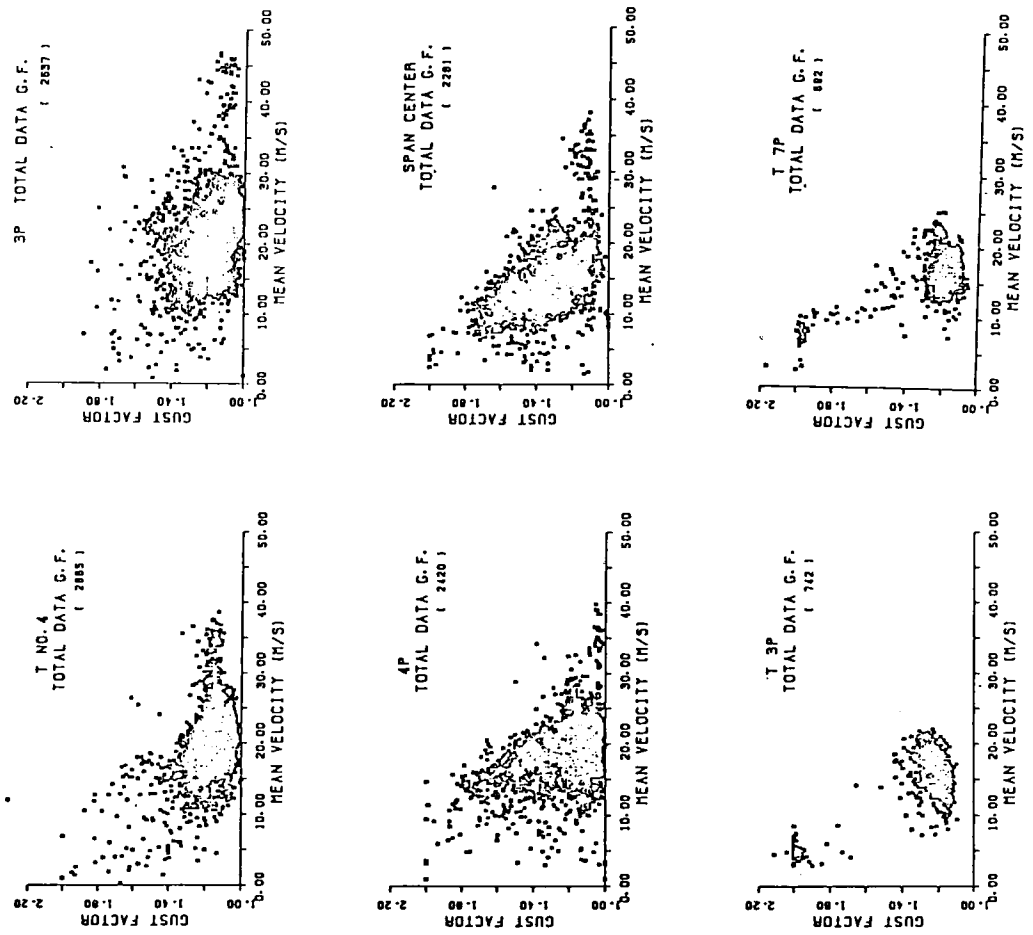


図5-4 鳴門海峡上の各測点における突風率 (1982.8~1984.10)

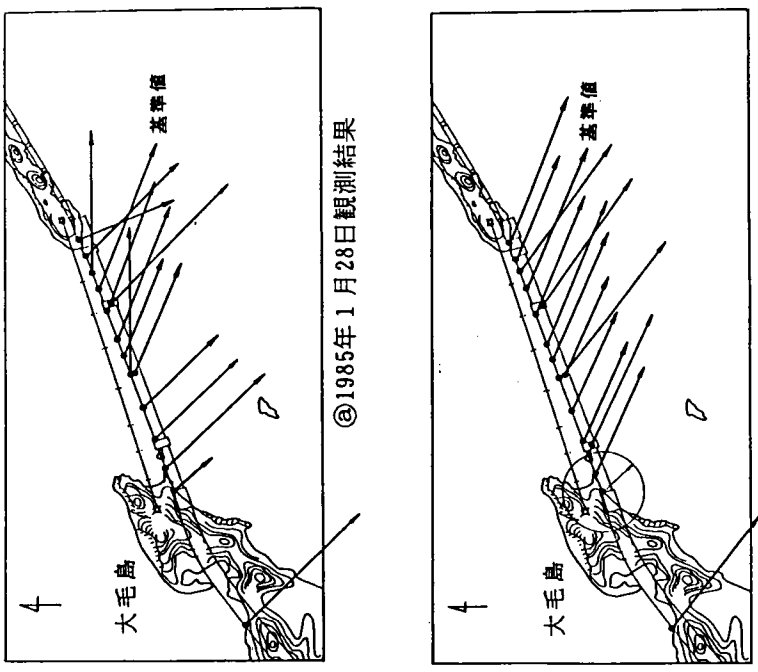
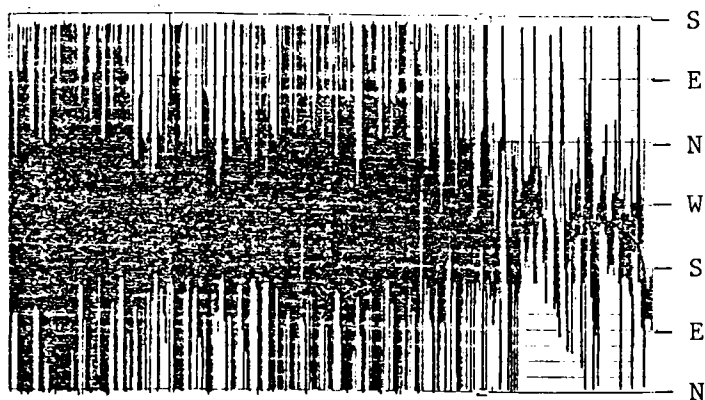
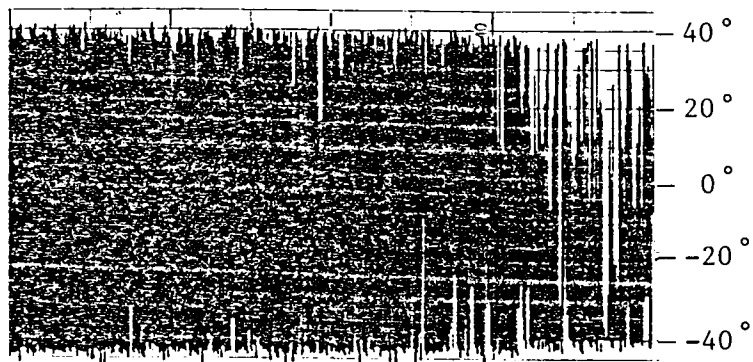


図5-3 鳴門海峡上の風向風速分布

(a) 風向



(b) 鉛直傾斜角



(c) 風速

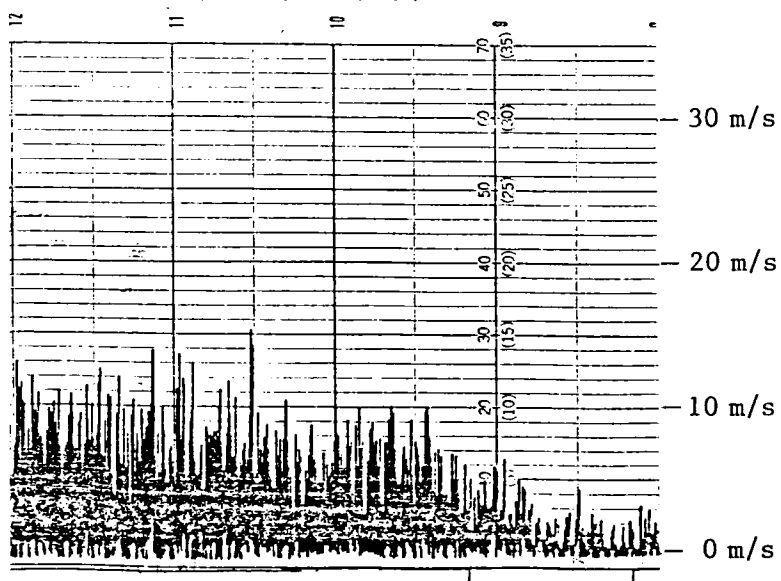


図5-5 門崎3Pにおける北西風作用時の観測記録

表5-3 各測点間の相関係数、回帰係数

point	全データ		北寄りの風		南寄りの風	
	V	V _{max}	V	V _{max}	V	V _{max}
	C R SVC		C R SVC		C R SVC	
TNo.4-3P	1.012 0.778 3.662	1.048 0.845 3.531	0.909 0.760 2.018	0.916 0.716 2.649	1.041 0.774 3.816	1.102 0.912 2.887
TNo.4-4P	0.954 0.808 2.692	0.989 0.747 3.461	0.963 0.626 2.784	1.088 0.632 3.436	0.949 0.862 2.344	0.940 0.883 2.440
TNo.4-CL	0.756 0.803 2.798	0.852 0.856 2.671	0.726 0.576 2.460	0.841 0.683 2.568	0.776 0.833 2.966	0.862 0.907 2.598
TNo.4-T3P	0.753 0.675 3.047	0.848 0.696 3.239			0.786 0.745 1.752	0.879 0.788 2.228
TNo.4-T7P	0.822 0.840 2.114	0.909 0.909 1.692			0.838 0.911 1.161	0.914 0.932 1.333
CL-3P	1.269 0.772 3.884	1.195 0.844 3.492	1.221 0.736 2.379	1.082 0.820 2.120	1.298 0.761 4.350	1.265 0.908 3.115
CL-4P	1.214 0.848 2.954	1.141 0.848 3.140	1.262 0.709 2.631	1.250 0.794 2.697	1.192 0.872 3.179	1.079 0.912 2.630
3P-4P	0.931 0.721 3.597	0.926 0.673 4.436	1.027 0.662 2.737	1.160 0.739 3.093	0.893 0.749 3.349	0.847 0.891 2.468

表5-4 各測点間の強風発生要因別相関係数、回帰係数

point	T		2L		L		W	
	V	V _{max}	V	V _{max}	V	V _{max}	V	V _{max}
	C R SVC		C R SVC		C R SVC		C R SVC	
TNo.4-3P	1.059 0.763 5.220	1.103 0.918 4.117	0.950 0.714 3.919	1.012 0.772 4.459	1.047 0.762 2.718	1.083 0.825 2.219	0.935 0.774 1.825	0.949 0.739 2.324
TNo.4-CL	0.839 0.858 3.795	0.894 0.896 3.457	0.683 0.816 2.405	0.810 0.835 2.924	0.736 0.779 2.051	0.837 0.818 1.861	0.781 0.756 1.668	0.883 0.796 1.870
TNo.4-4P	1.001 0.899 2.515	0.996 0.894 2.778	0.880 0.863 2.487	0.917 0.816 3.304	0.948 0.665 2.708	0.956 0.572 3.207	0.983 0.675 2.430	1.125 0.713 2.875
CL-3P	1.111 0.853 3.974	1.149 0.903 3.891	1.374 0.775 3.785	1.242 0.844 3.776	1.406 0.715 3.381	1.289 0.748 2.842	1.193 0.754 2.009	1.079 0.846 1.812
CL-4P	1.121 0.925 3.035	1.066 0.905 3.615	1.243 0.859 2.601	1.104 0.880 2.823	1.264 0.674 2.969	1.136 0.742 2.643	1.252 0.691 2.493	1.271 0.870 1.999
3P-4P	0.987 0.826 3.960	0.909 0.831 4.784	0.887 0.735 3.591	0.870 0.791 3.826	0.884 0.504 3.573	0.870 0.515 3.495	1.040 0.681 2.427	1.173 0.808 2.440

5-3 瀬戸大橋周辺部の風況特性に及ぼす局所地形の影響

5-3-1 周辺気象官署等における長期強風観測結果

本州四国連絡橋公団によって行なわれた1975年から1984年までの10年間の強風観測結果⁵⁻⁴⁾に基づき、本ルート周辺の強風特性の概要を示す。

図5-6には風速レベルを同時に評価した風配図が示されている。これによれば、10m/s以上の強風の発生は瀬戸内海と平行な東西方向に卓越することが明かであるが、番ノ州ではNE~ENE及びWNW~WSWに集中しているのに対し、櫃石では、E及びW~WSWが卓越しているもののN~Eの間で相当の頻度で発生しており、観測地点毎に傾向が大きく変化することを示している。

強風が30分以上継続して吹く回数を表5-5に示す。この結果を前節に示した大鳴門橋と比較すると、15m/s以上の出現頻度は本ルートの方が圧倒的に低くなっている（番ノ州において年平均24回弱、大鳴門にて120回）。

表5-6、7には番ノ州における最大風速記録を上位10位まで示し他地点の同時記録と比較している。測器の設置条件がそれぞれに異なるために単純比較はできないが一見して各観測点間の相関は、この種の極値に関する限り良好とは言えず、地形あるいは強風の成因毎に異なった風速分布を示していることが予想される。しかし、冬期季節風や台風通過時には上位10位までの瞬間最大風速は全て30m/sを越えている。

また、風速階級別突風率を図5-7に示した。番ノ州では陸上部（E~S方向）から作用する風、櫃石ではW方向（櫃石島を越流する風）の突風率が若干大きいようであるが平均的には番ノ州で1.25、櫃石で1.30であり、従来の観測結果と比較してもほぼ妥当な値が得られている。

番ノ州、櫃石において観測された平均風速を用いてルート周辺の4ヶ所の気象官署データとの比較が行なわれ、解析結果の一例として図5-8に、高松と番ノ州50mのデータの風速の相関分析結果を示している。ここに示す例は、比較的相関係数Rの大きい値が得られたもので、この場合でも最大で $R=0.65$ 程度であり決して高い精度とは言えない。この結果から、周辺気象官署のデータに基づいて瀬戸大橋に作用する風速の推定を行うことは、余り良い結果が期待できないことがわかる。

表5-5 30分以上の強風継続時間の出現回数⁵⁻⁴⁾

統計期間：昭和50年1月～昭和59年12月

地点 季節 基準風速	番の州 50 m					瀬 石 30 m				
	春 季	夏 季	秋 季	冬 季	全 年	春 季	夏 季	秋 季	冬 季	全 年
10 %	350 (26)	112 (4)	289 (28)	994 (26)	1745 (84)	61 (8)	53 (8)	84 (19)	81 (6)	279 (41)
15 %	29 (1)	9 (1)	50 (4)	146 (1)	234 (7)	2 (-)	6 (3)	5 (2)	- (-)	13 (5)
20 %	2 (-)	- (-)	14 (3)	6 (-)	22 (3)	- (-)	- (-)	2 (-)	- (-)	2 (-)

上段：横風
(下段)：横風以外

表5-6 番ノ州日最大平均風速上位10位と他地点との比較⁵⁻⁴⁾

順 位	年月日	地点	番の州50m	瀬 石30m	多 度 津	高 松
1	S 55. 10. 26	WSW	3 4.2	WSW 2 0.0	W 1 4.3	W 1 3.6
2	S 55. 12. 4	WSW	3 0.4	WSW 1 8.0	W 1 4.6	W 1 4.8
3	S 55. 10. 25	W	2 9.5	WSW 1 7.1	W 1 4.3	W 1 2.7
4	S 55. 10. 27	W	2 8.3	W 1 5.6	W 1 3.6	W 1 3.2
5	S 54. 11. 6	WSW	2 7.5	WSW 1 6.2	W 1 3.3	W 1 2.5
6	S 54. 10. 19	N	2 7.4	N 2 4.6	N 1 8.6	NNW 1 3.2
7	S 56. 1. 2	WSW	2 7.4	W 1 8.5	W 1 2.7	WSW 1 3.1
8	S 55. 12. 13	W	2 5.2	W 1 4.8	W 1 3.4	WNW 1 1.6
9	S 54. 9. 30	NNW	2 5.2	N 2 3.9	N 1 8.0	N 1 5.6
10	S 54. 9. 4	SW	2 5.2	SSW 1 8.3	WSW 1 3.8	SW 1 1.7

表5-7 番ノ州日最大瞬間風速上位10位と他地点との比較⁵⁻⁴⁾

順 位	年月日	地点	番の州50m	瀬 石30m	多 度 津	高 松
1	S 55. 12. 4	WSW	3 5.5	WSW 2 5.8	W 2 5.6	W 2 5.9
2	S 55. 10. 26	WSW	3 5.0	WSW 2 7.0	W 2 8.3	W 2 6.9
3	S 55. 10. 25	W	3 5.0	WSW 2 3.9	W 2 5.1	W 2 3.8
4	S 58. 2. 18	WSW	3 4.7	WSW 2 8.9	W 2 8.3	W 2 9.0
5	S 55. 1. 17	WNW	3 4.5	NW 1 9.7	NW 2 4.6	NW 2 2.6
6	S 54. 10. 19	NNW	3 4.4	N 3 0.4	N 2 9.4	NNW 2 4.4
7	S 55. 10. 27	WSW	3 3.9	WSW 2 2.1	W 2 5.2	W 2 3.1
8	S 55. 12. 3	WSW	3 3.5	SW 2 2.8	W 2 5.6	WSW 2 4.5
9	S 56. 1. 2	WSW	3 3.2	W 2 2.7	W 2 3.1	WSW 2 4.5
10	S 54. 11. 6	WSW	3 3.1	W 2 0.6	W 2 3.7	W 2 1.9

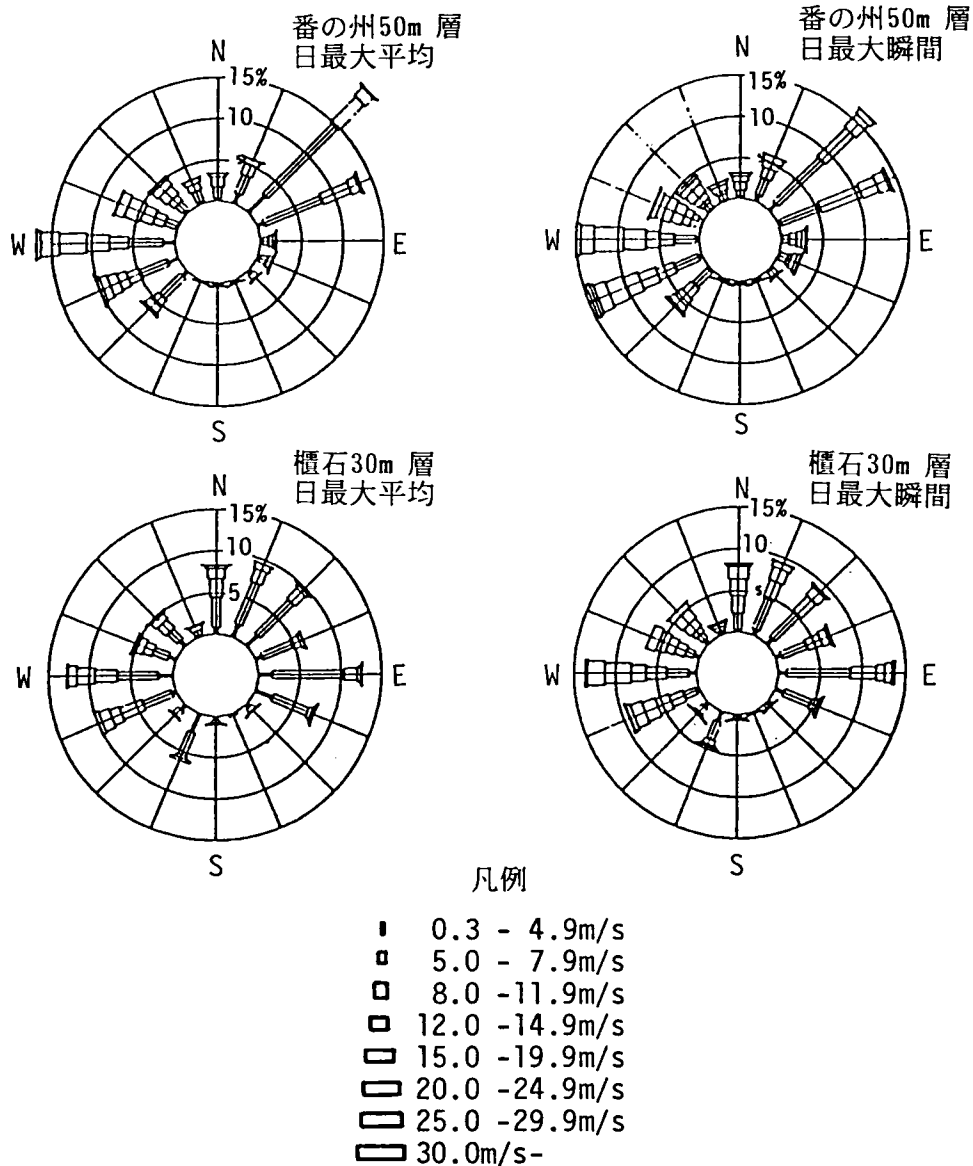


図5-6 日最大平均・瞬間の風向別風速階級別風配図（昭和50～59年）⁵⁻⁴⁾

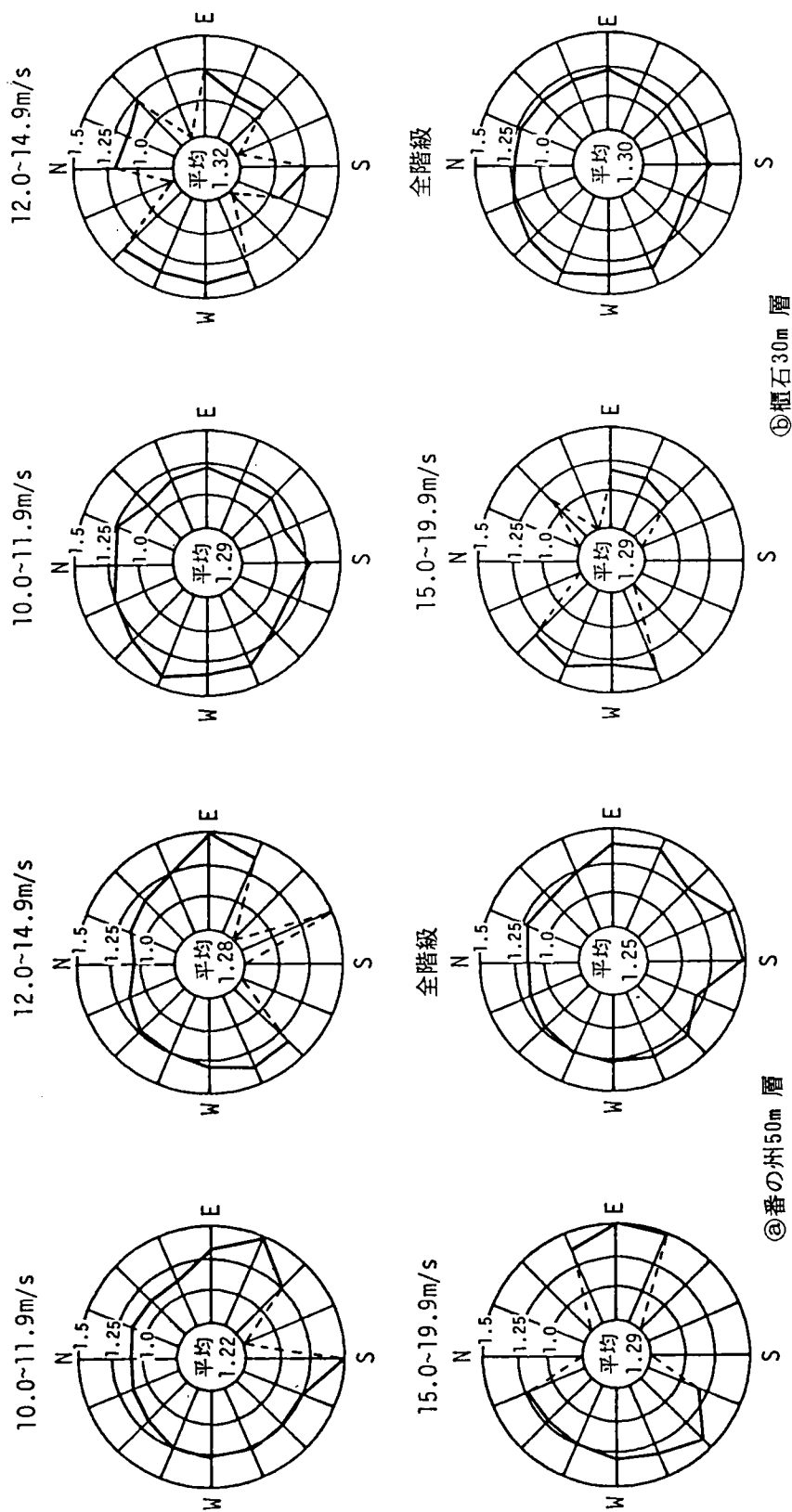
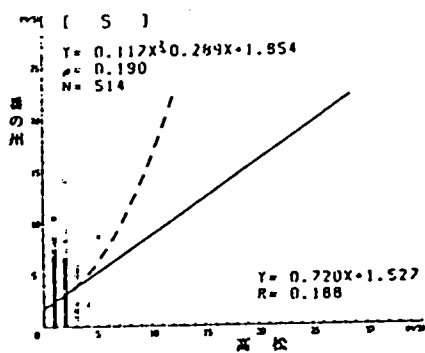
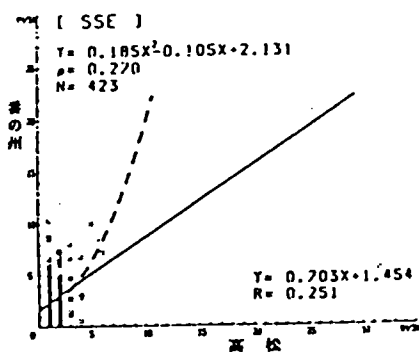
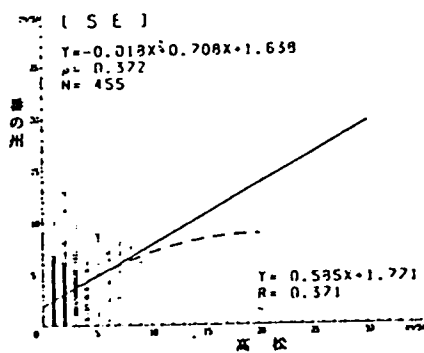
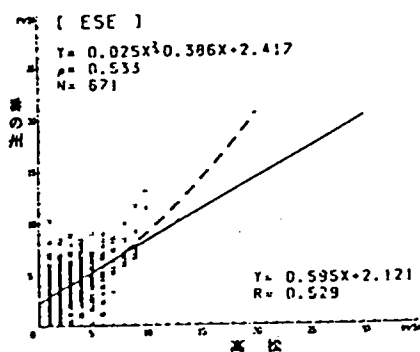
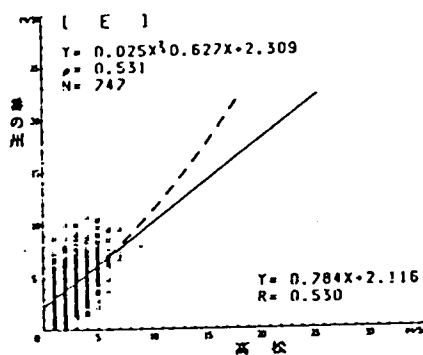
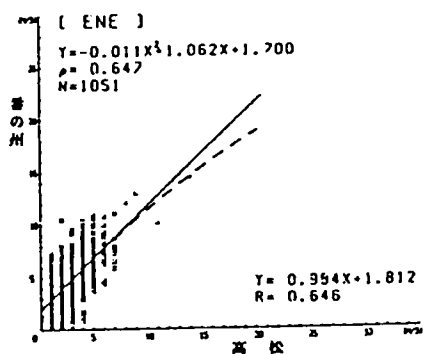
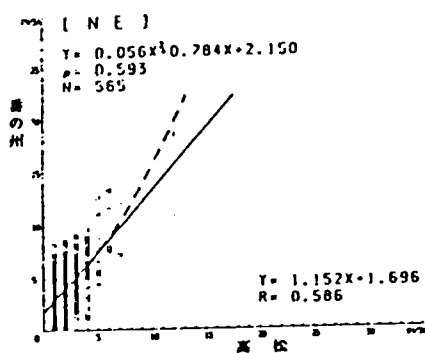
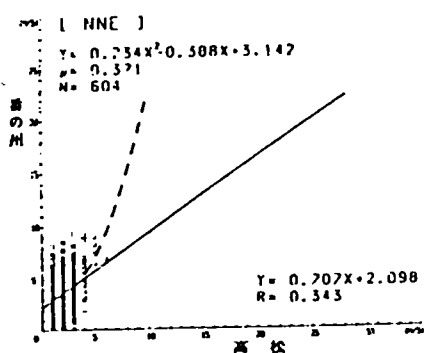


図5-7 風向別・風速階級別突風率（日最大：昭和50～59年）⁵⁻⁴⁾



統計期間：昭和54年1月～昭和59年12月

図5-8 高松と番ノ州50m の風速相関⁵⁻⁴⁾

5-3-2 児島・坂出ルート上における強風観測結果

前項に述べたように、各気象官署及び瀬戸大橋周辺の観測基地において得られた強風データ相互には、さほど強い相関関係が認められないため、瀬戸大橋上の風の性質を正しく推定することは困難である。このような観点から、本州四国連絡橋公団において昭和62年1月24日～3月10日間、冬期季節風を対象として図5-9に示される測点において連続観測⁵⁻⁵⁾が行なわれた。本節は、この強風観測結果から、海峡部における風況特性と周辺地形の対応関係について考察を加えたものである。

まず、測点4Aは南備讃瀬戸大橋の北側側径間上のクロスブリッジ上の測点であり、この点の風速値を全データの基準値として用いている。測点はトンネル出口(D)、島と島の間の収束風(B、C)、島の上空(A)といった地形の影響が現われ易いと思われる地点を選んでいる。また、図中には各測点における全風速階級の風配図が示され、上位3位までの強風レベルと風向が示されている。冬期季節風であるためE-W方向(西風)が卓越している。高度140mの4A点よりもB、C点のような島による収束の影響を受ける地点の風速が高いことが注目される。10m/s以上の強風が全データ中に占める割合も20%以上であり、このような場所が一般に強風域となると考えられる。B点は、西方の本島の影響を強く受けており、西風、南西風の場合が西南西風よりも高い値を示しているが、これは島を回る風の影響が現われていると考えられる。測点Aは与島上であるがこの地点は島を越える風の増速が予想される場所であり地形の影響も明確に現われ、卓越風向がWとWNWにほぼ限定されている。しかし、このことは測点を少し移動させると地形の影響によって、別の結果になる可能性もある。また、測点Dはトンネル出口付近であり、車輛走行に及ぼす影響が懸念される地点であるが、本観測では風の強度は最小となっている。但し、この地点は西風に対しては、上流に位置する六口島や燈籠崎の影響を大きく受けていることが予想できる。また、図5-10は、各地点における平均風速と標準偏差を風向別に示したものである。平均風速については、東風の場合風速の値そのものは総じて小さいけれども、高度の高い4A点が最大となっており、西風の場合のように、収束風による高度と風速の逆転現象は顕著に現われていない。これは本ルート of 東側には風況を支配するような大きな島が近接していないためであると考えられる。従って、西風のケースでB、C点に強風が生じる原因は島同志の収束効果が存在してはいるものの、上流側の島の干渉効果が相当に大きいことを併せて示唆しており、このような局所的な周辺地形の風況特性に及ぼす影響をより定量的に評価する必要がある。

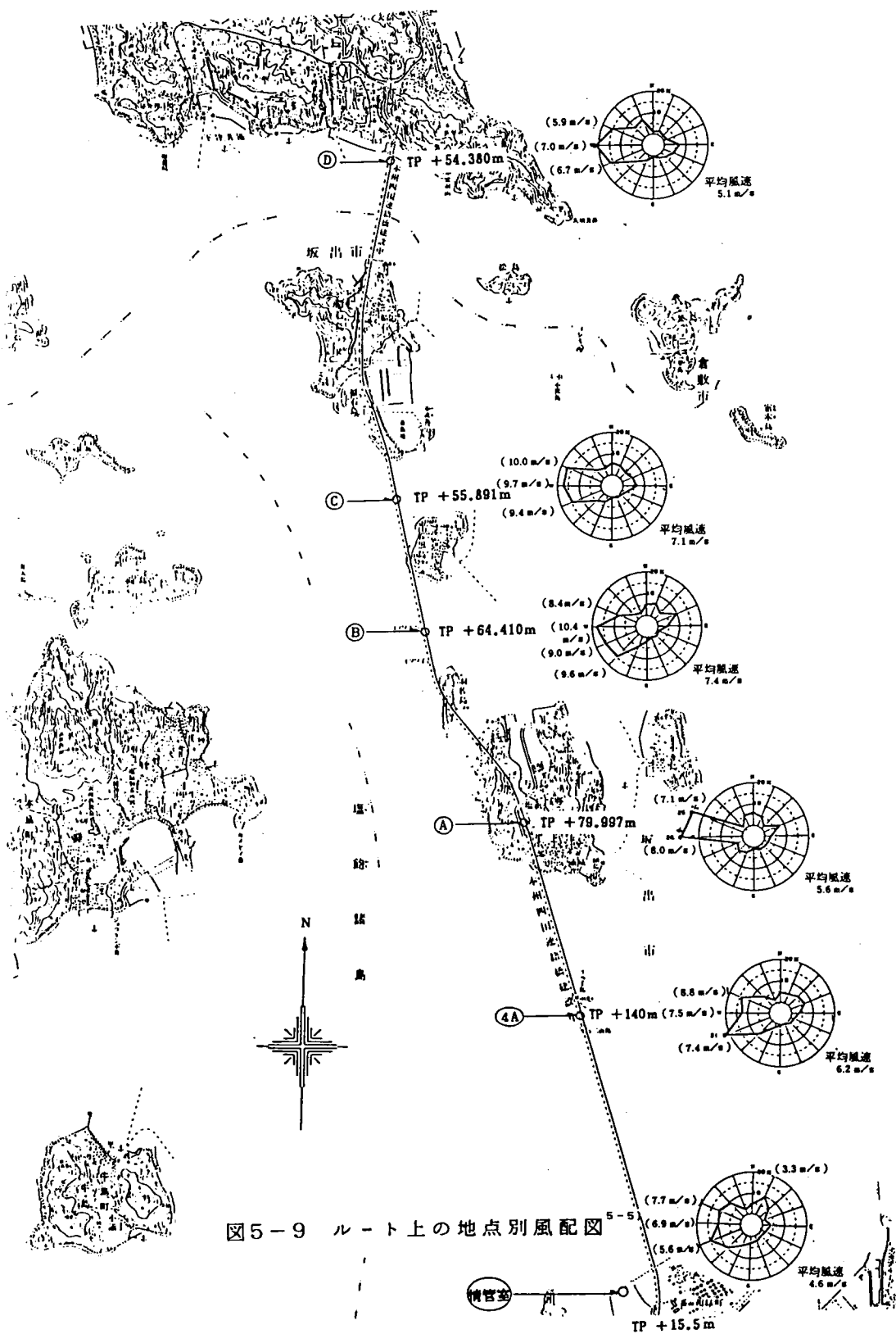


図5-9 ルート上の地点別風配図

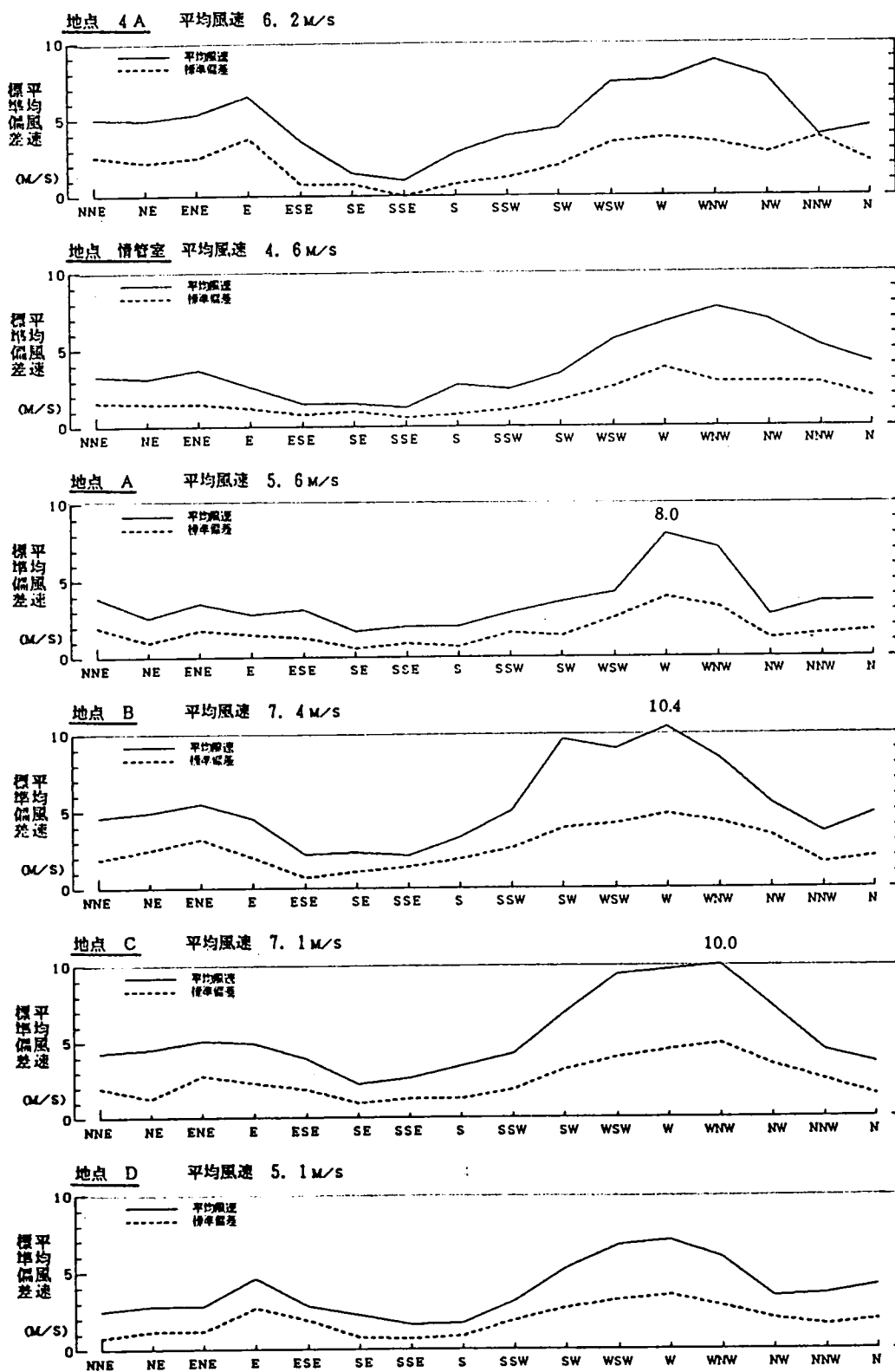


図 5 - 10 地点別風向別平均風速と標準偏差⁵⁻⁵⁾

5-3-3 縮尺地形模型実験による瀬戸大橋周辺部の風況特性

前項において本州四国連絡橋児島・坂出ルート周辺部の強風特性の概況を検討したが、海峡部の風況特性は、局所的な地形の影響を大きく受けていることが明かとなった。

そこで本項では、風速増加・減少が著しいと考えられる下津井瀬戸大橋周辺部（海峡からトンネルさらに谷状地形（収束効果）による増速が予想される；縮尺1/3,000）及び、丘状地形による増速或は上流側の島による気流の縮流・遮蔽効果等が予想される与島（縮尺1/2,000）及びその周辺部（縮尺1/4,000）を対象として行なった風洞実験による調査結果を簡単に示す。

図5-11は、模型化範囲を示したものであり、各模型には、周辺の島・山等を適宜付加している。実験風速は、根本の1/3乗則⁵⁻⁸⁾に従うものと仮定し、上空風速を約50m/sのレベルとなるように設定した。また、風向は、冬期の西風が卓越する事により、西寄りの3風向(W, WSW, WNW)と、強風の発現頻度は相対的に少ないものの台風の通過等を考慮して橋軸とほぼ直交する東寄りの3風向(E, ESE, ENE)とした。

各模型に作用する接近流は、海面上の風としてよく使用されているべき指数 $\alpha=1/7$ 程度の境界層乱流を目標としてスパイアにより発生させた。なお、境界層乱流の特性は、2-3節にまとめて示している。

(a) 下津井瀬戸大橋周辺の強風特性

図5-12 (a)～(f)に、橋面上各測点の風速ベクトルを風向別に示した。各風速値は測定風速 U を境界層外風速（地表面の影響を受けないと考えられる上空数百メートルにおける風速値） U_0 で基準化(U/U_0)している。

また、海峡横断面内の風速分布を図5-13 (a)～(f)に各風向別に示す。太い実線は橋梁路面高さであり黒丸印(●)は計測点である。

図5-14 (a), (b)は、橋面と同一高さにおける基準化風速 U/U_0 、乱れの強さ I_u 、及びピークファクターを3と仮定したときの最大瞬間風速推定値 U_{max}/U_0 を東西の風向別に示したものである。なお、最大瞬間風速 U_{max} は、次式より推定した。

$$U_{max} = U + 3\sigma_u = U(1 + 3\sigma_u/U) = U(1 + 3I_u) \quad (5-1)$$

ただし、 U ：平均風速、 σ_u ：変動風速の標準偏差、 I_u ：乱れの強さ、 $I_u = \sigma_u/U$

以上の実験結果から、海峡中央部では実験した全ての風向において、上空の風向とほぼ一致した方向に風が作用しているが、上流側に障害物（島・山等）のない東、東南東及び

西の風向において強風となり、六口島、燈籠岬、鷺羽山等の下流に位置する西南西、西北西、東北東の風向で弱くなっている。スパン中央点の増速効果を意味する接近流速との比 $U(h)/U_{\infty}(h)$ は、最大でも3%程度の増速であり、減速率も高々15%と全体としてほぼ1に近い値であり、スパン中央部の増速効果は非常に小さい。

また、東北東の風向における鷺羽山側主塔付近の測点は、主風向と異なる方向にスパン中央部と同程度の強風が作用し、海面に近い測定高さにおいても強風域となっている。

この現象については、第8章において詳細に検討するが、半島状地形（鷺羽山）の下流側に生じる旋回渦に起因した強風と考えられる。

東南東の風向では、半島に沿って気流が流れることによって鷺羽山側主塔付近が海峡中央部以上の強風域となっている。また、檀石島周辺部においても檀石島を越流することによって増速されている。

西北西の風向では、約1.5km 上流側に位置する燈籠崎の影響によって海峡中央部よりやや下津井寄りに急激な減速域（燈籠崎のwake）が存在し、その両側においてやや増速域となっている。以上に示したように、既往の海峡周辺における風速分布調査結果⁵⁻⁹⁾と同様に周辺或は上下流側地形が海峡部の風速分布特性に大きく影響を及ぼすこと及びその影響は風向によって大きな差がある事が認められる。

また、V字谷状地形の鷺羽山トンネル北出口においては、風向に無関係に海峡中央部と同程度の比較的強い風が、ほぼ道路と直交する方向に作用しており、このような地形における増速効果については、第7章において調査・検討する。

乱れの強さ I_u の分布特性は、概ね、各風向ともにスパン中央部で小さい値、鷺羽山トンネル南出口付近で大きい値となっている。ただ、鷺羽山を越流或は迂回してくる東北東の風についてはスパン中央部においても20%以上の大きい乱れを有していること、下津井側主塔付近における平均風速は低い値であるが、山を越流した流れが巻き込むことにより乱れが大きくなり、 $3\sigma_u$ で推定した最大瞬間風速がこの地域で最大となり他風向と異なっている。なお、ピークファクターを3と仮定した場合には、東南東以外の全風向において、最大瞬間風速の発生する地点と最大平均風速の生じる地点は異なっている。

また、風洞設定風速の異なる西風における結果を図5-15に示す。設定風速の変化に対して ($U_0=3.5\text{m/s}$, $U_0=7\text{m/s}$) 風速分布は、ほとんど変化しないことが明らかであり、本研究対象地形においては、Re数の影響は、比較的小さいと考えられる。

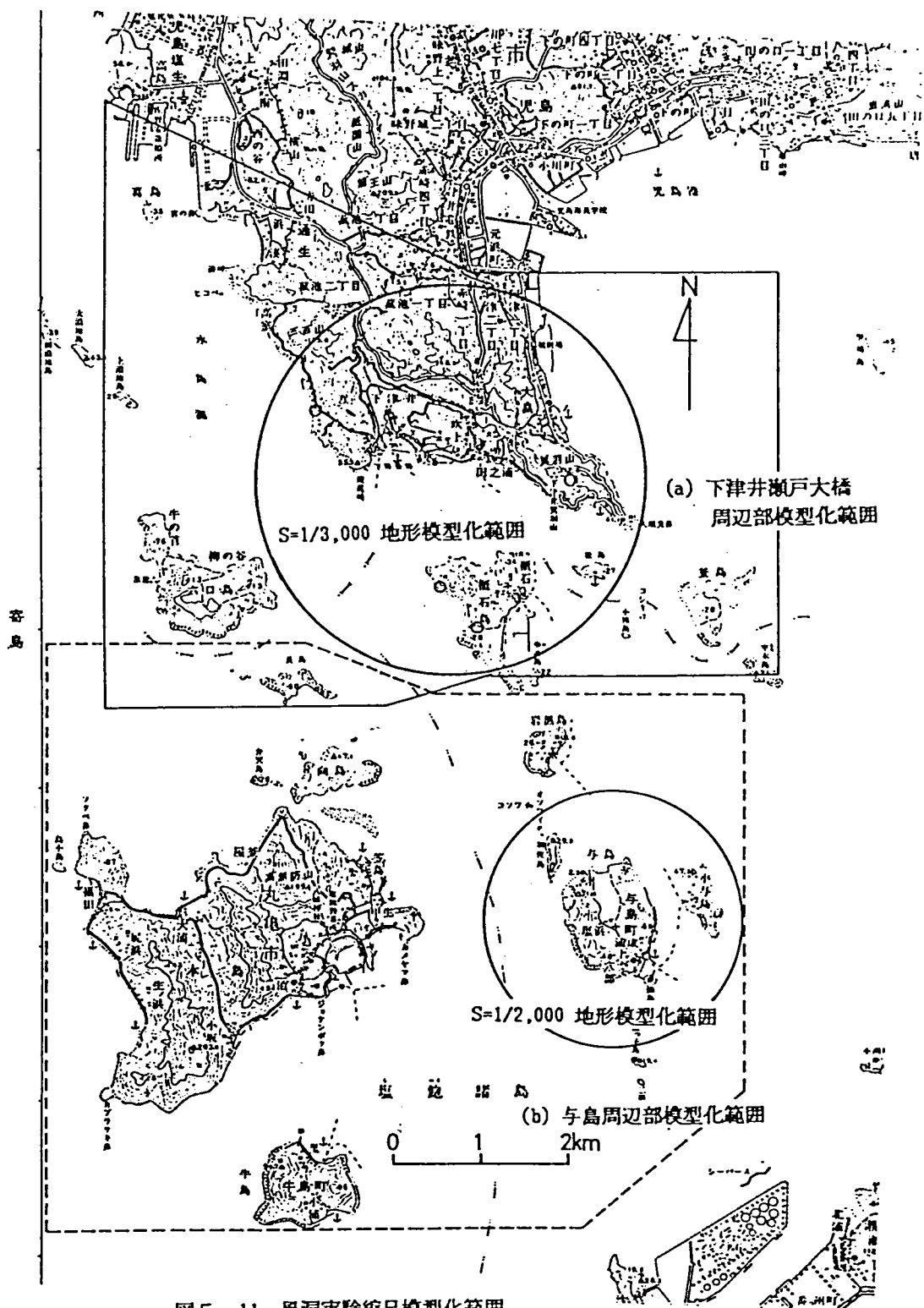


図 5-11 風洞実験縮尺模型化範囲

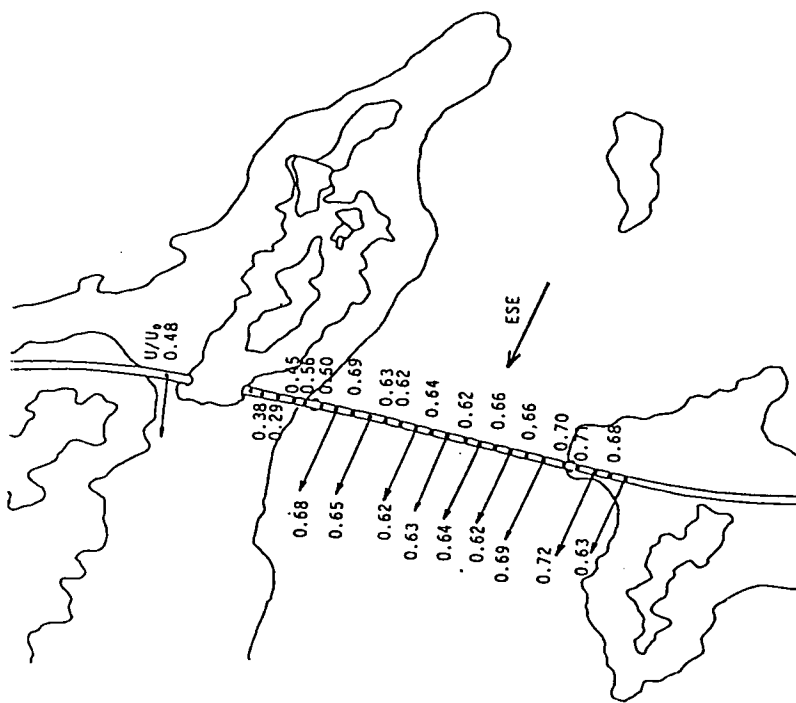
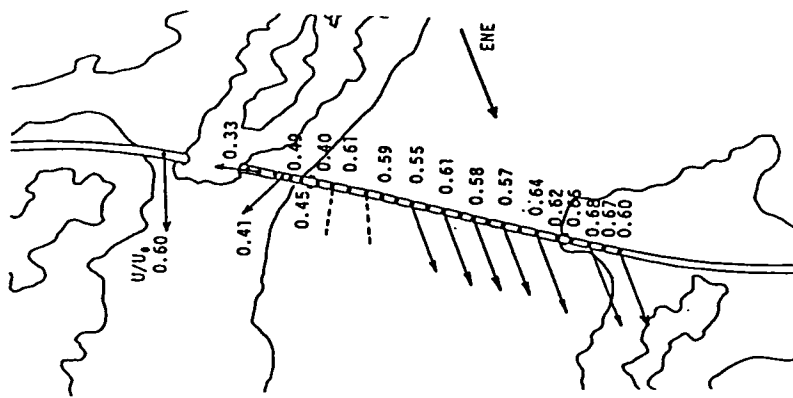
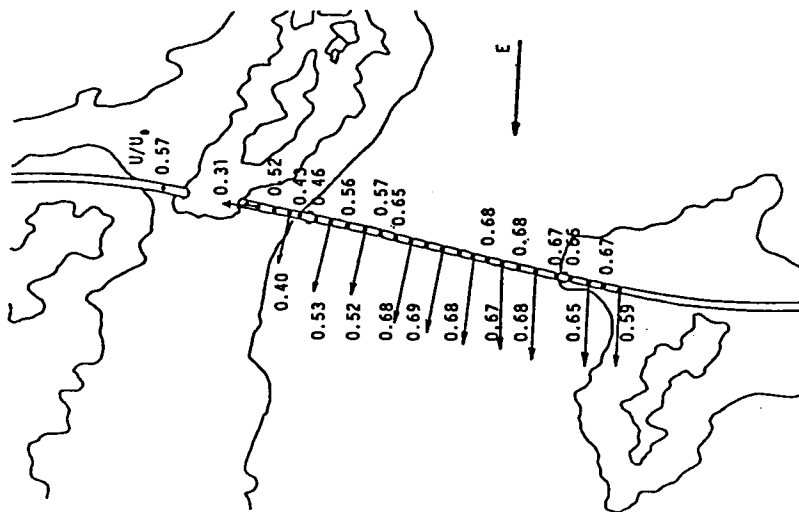
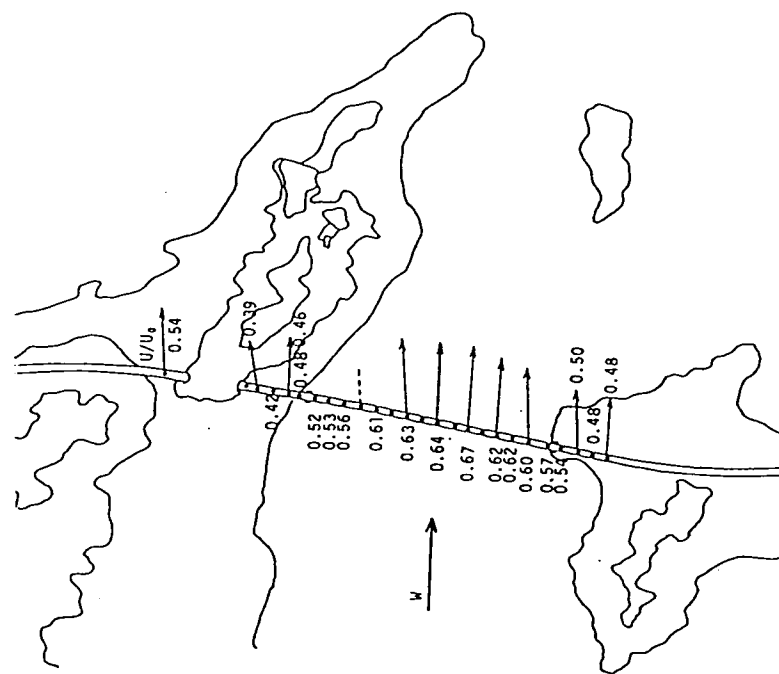
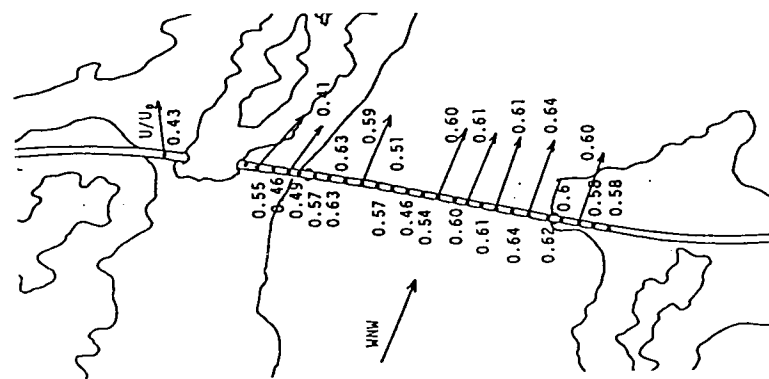


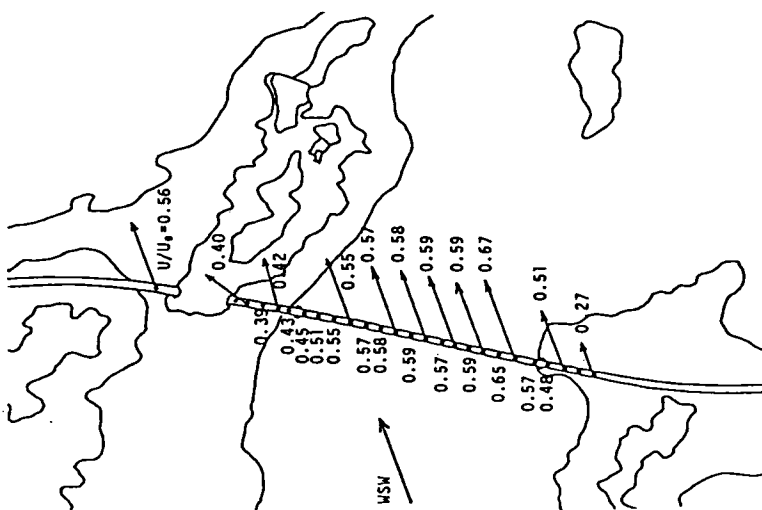
図 5-12 下津井瀬戸大橋橋面上風速ベクトル (数値は U/U_0 を示す。)



④ 風向：西



⑤ 風向：西北西



⑥ 風向：西南西

図 5-12 下津井瀬戸大橋橋面上風速ベクトル (数値は U/U_0 を示す。)

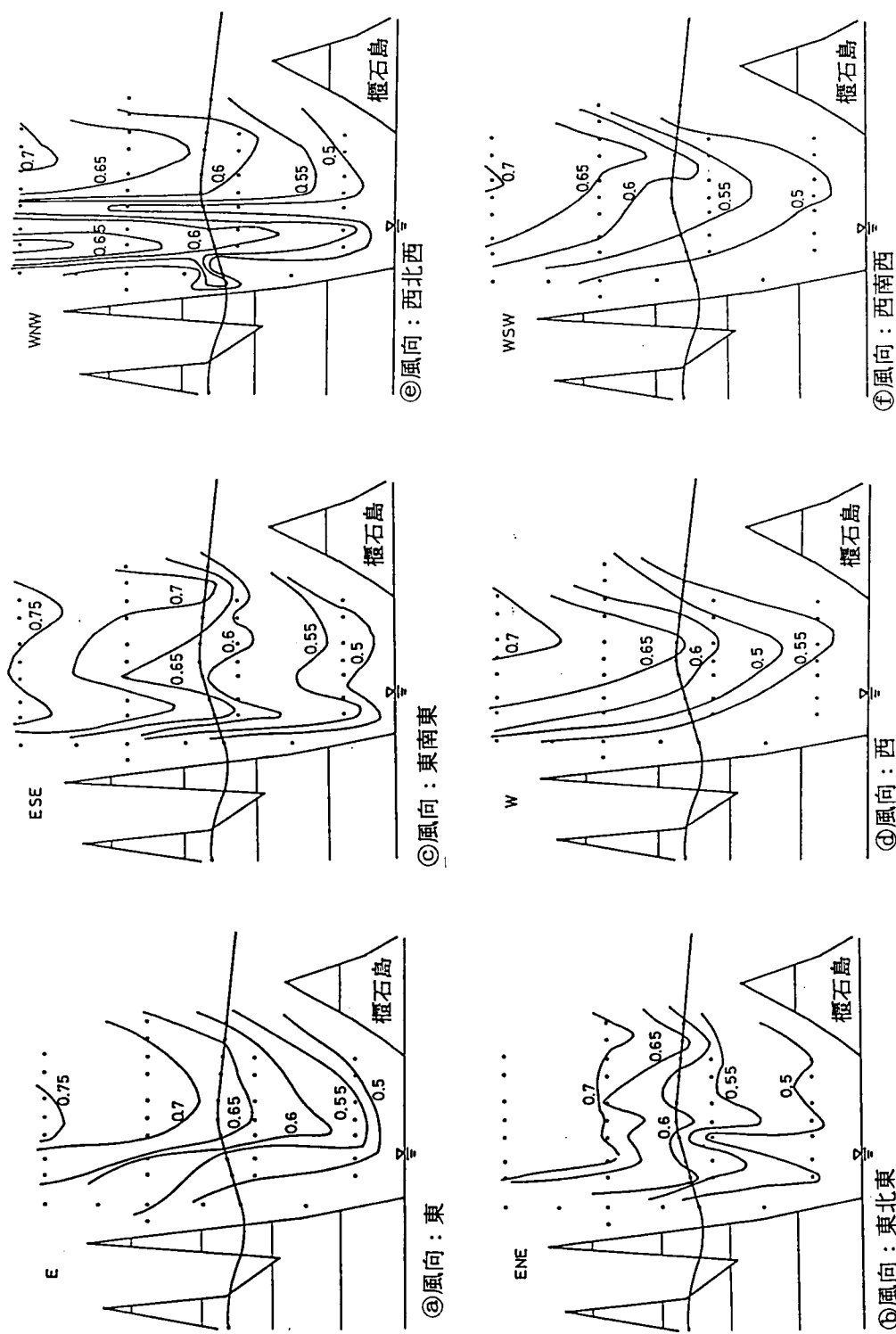


図 5-13 下津井瀬戸大橋横断面風速分布 (数値は U/U_0 を示す。)

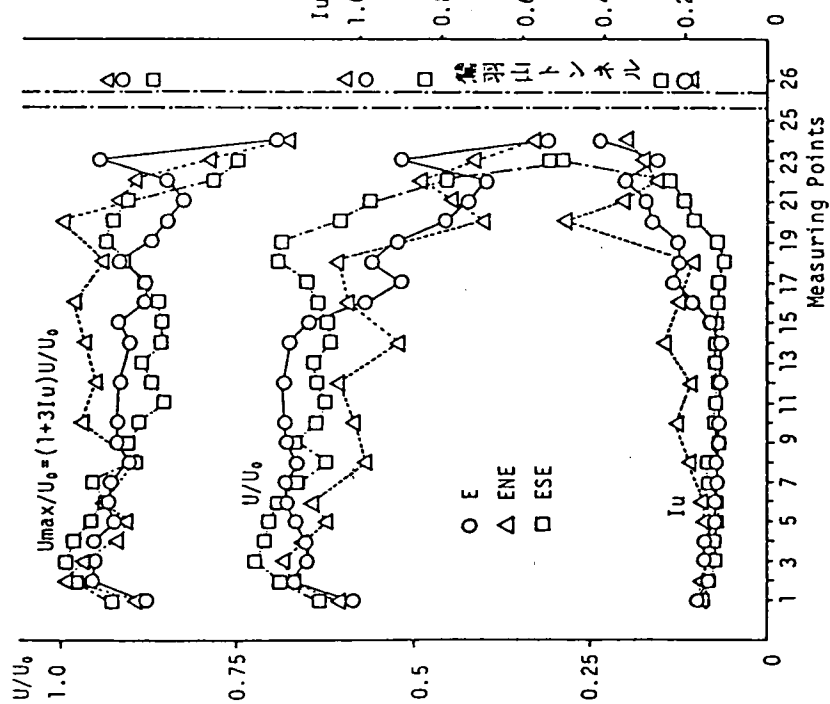


図5-14 ㊤ 東寄りの風における下津井大橋橋面上強風分布特性
($U/U_0, I_u, U_{max}/U_0$)

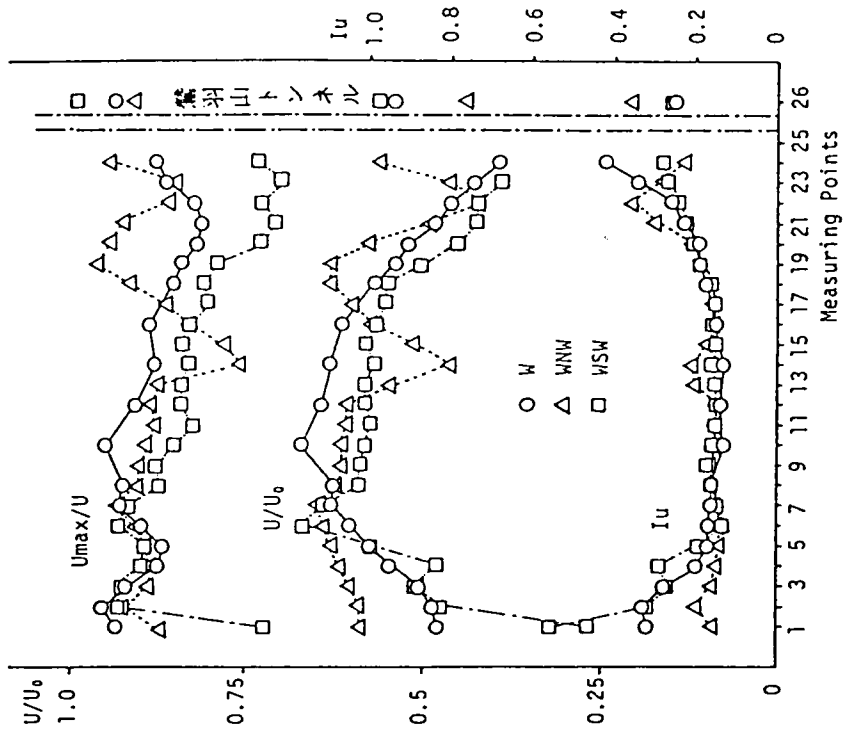


図5-14 ㊤ 西寄りの風における下津井大橋橋面上強風分布特性
($U/U_0, I_u, U_{max}/U_0$)

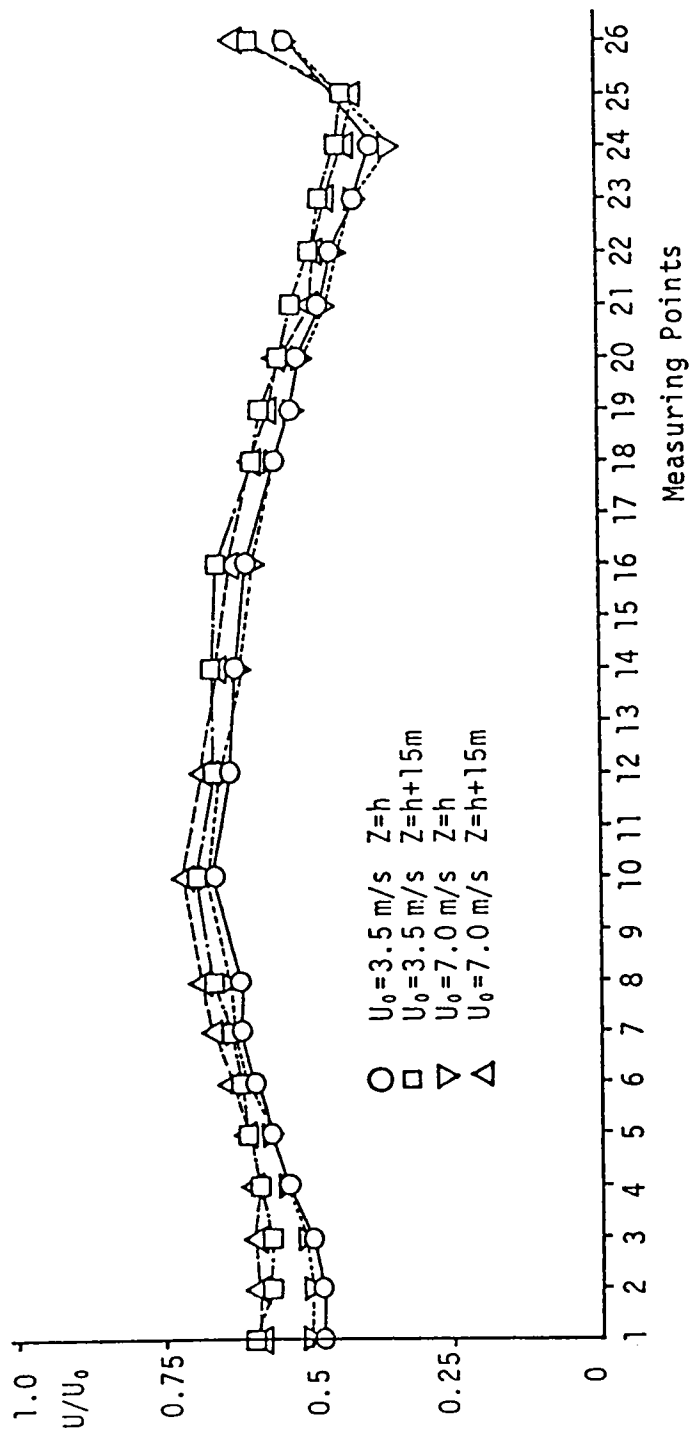


図 5-15 設定風速の風速分布特性に及ぼす影響 ($U_0 = 3.5 \text{ m/s}$, 7 m/s) 風向; 西

(b) 与島周辺部の強風特性

実験に使用した縮尺1/2,000 と1/4,000 の与島周辺地形模型を写真5-1、5-2 に示す。

両模型間で、測定位置、模型製作精度等に若干の差があり、さらに、2-3節に示すように両模型に作用する接近流の乱流構造（べき指数 α (1/2,000)=0.16、 α (1/4,000)=0.18）も若干異なっている。このような差が、風速分布特性に及ぼす影響を調査したものが、図5-16である。横軸は各測点であり、大文字が縮尺1/2,000 模型、小文字が1/4,000 模型の測点である。縦軸は境界層外風速（地表面の影響を受けないと考えられる上空数百メートルにおける風速（風洞設定風速）であり、縮尺1/2,000 模型では $U_o=4\text{m/s}$ 1/4,000 模型では $U_o=3.15\text{m/s}$ ）で無次元化された風速である。ただし、縮尺1/4,000 模型の西風については、与島の上流側に位置する本島の及ぼす影響も併せて調査している。

まず、本島の影響を考慮しない場合の実験結果から模型の縮尺率の差異による与島上の風速分布を比較すると、1/2,000 地形模型の測点Rにおいて東西両風向とも風速が減少している。これは測点Rが北備讃瀬戸大橋のアンカレッジ上にあり、アンカレッジによる遮蔽効果が現われていると考えられる。1/4,000 ではアンカレッジは模型化されていないために際立った変化は生じていない。このように、地形・構造物をより詳細に再現している縮尺1/2,000 模型において、より現実に近い流れが再現されていると考えられ、各測点間における風速差が大きく現われる傾向がある。また、両模型の測定高さは異なっているが、模型精度・測点の不一致等を考慮しても各測点毎の風速の様子は縮尺の異なる2つの模型の間で全体として明確な差となっていない。しかし、風速は程度の差はあるものの測定高さに依存することより、1/4,000 地形模型は実橋の高さと異なった高度における値であることに留意する必要がある。

また、西風時における本島の影響は、無視できるものでなく、西寄りの風を議論する場合には、本島を含んだ1/4,000 地形模型を用い、逆に、東寄りの風の場合には、模型精度等に優れている縮尺1/2,000 地形模型を用いて検討した。

図5-17 (a)～(f) に与島及びその周辺部の風向分布及び境界層外風速で無次元化した風速(U/U_o)を示す。図5-18 (a), (b) は前節に示した図5-13と同様であり、設定風速で基準化された平均風速 U/U_o 、乱れの強さ I_u 及びピークファクターを3と仮定した時の最大瞬間風速推定値 U_{max}/U_o を縮尺1/2,000 模型及び縮尺1/4,000 模型別に示したものである。図5-19は、西寄りの風向時におけるルート横断面の等風速線である。

東寄りの風に対しては各風向ともに与島の東側の山の後流に位置する地点において風速

が大きく減少し、乱れの強さが増加し、風向もバラツキが大きくなっている。逆に、山を迂回する流れが作用する地点では、接近流 ($U_{\infty}(80\text{m})/U_0=0.73$) より増速されている。

このような増減速の生じる測点は当然風向によって異なり、各測点とも風向によって風速値が大きくバラツキ、橋面に作用している代表的な風速の測定が難しいことが予想される。たとえば、与島東側の尾根に小与島を加えた地形の影響と風向の関係が本実験の範囲でも、かなり明確に現われている。すなわち、東風では、測点IからQ付近の測点が尾根や島の陰に入って減速域となっているが、東北東風では測点KからQと減速域は南にずれる。さらに、東南東の風になると、測点BからSまで、I点付近を除いて全体的に減速域となっていることなど風向依存性が極めて強い。

本ルートは与島の西側海岸を南北に通過しているため、東風では与島自身の地形因子の影響を大きく受けるのに対し、西寄りの風の場合、前述のように上流側の本島の影響が非常に大きく、東風で強風となる与島と岩黒島間の海峡部では、風向によって強風域が限定されるとともに、その最大風速も東風ほどでなく乱れの強さも若干大きい値となる。与島上の測点では、接近流（測点Q12～Q22）より強い風が観測されており、与島の存在による増速効果（丘を越える流れによる増速効果、第6章において検討する。）が明らかであるが、風向の変化とともに強風の作用域は異なっている。また、風向分布図より明らかなように、与島自身の局所地形の及ぼす影響も大きく、測点に作用する風が主風向と大きく異なる場合もある。

また、本島の及ぼす影響も風向によって大きく異なっており、西風では向島と本島の間で強風域が出現し、ルート上においてもその影響を大きく受けた風速分布となっている。

ルート横断面上の等風速線より、周辺地形の及ぼす影響は、路面高さの及ぼす効果より大きいことが明らかであり、局所地形の風速に及ぼす効果を定量的に把握することが重要であることが再確認される。

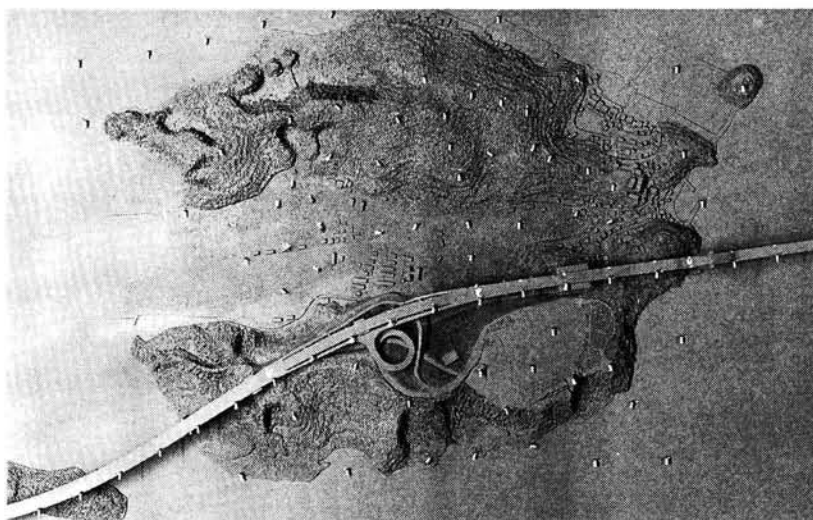


写真5-1 縮尺1/2,000 与島地形模型

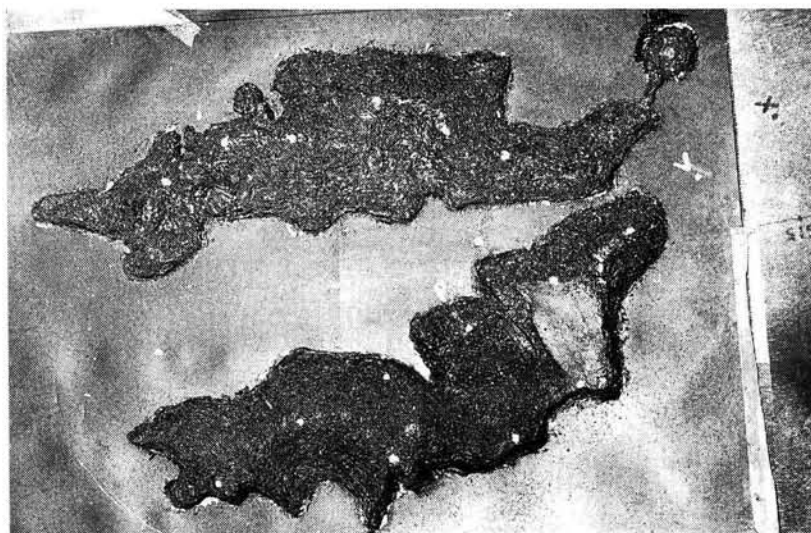


写真5-2 縮尺1/4,000 与島地形模型

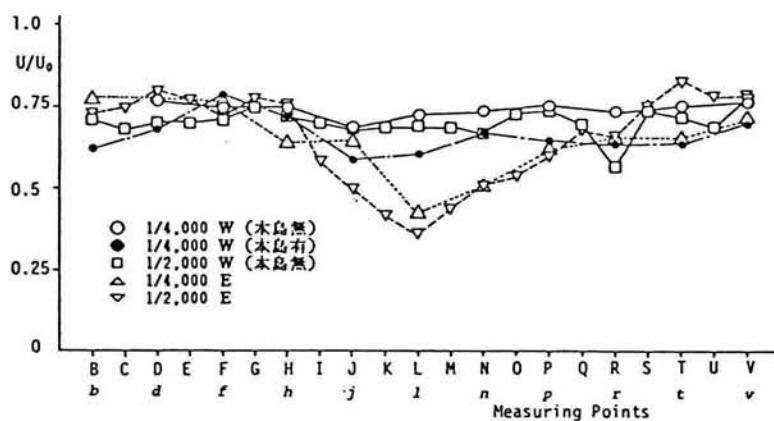


図5-16 両模型間の風速分布特性及び本島（上流側の島）の及ぼす影響

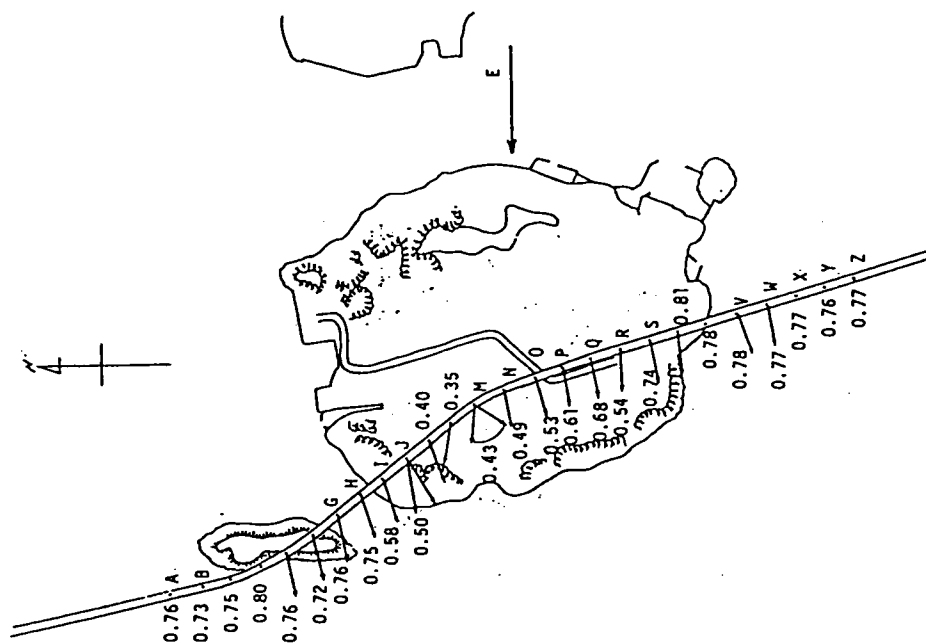


図 5-17 ③ 与島1/2,000 橋面上風向分布
及び規準化風速 (U/U_0) 風向；東

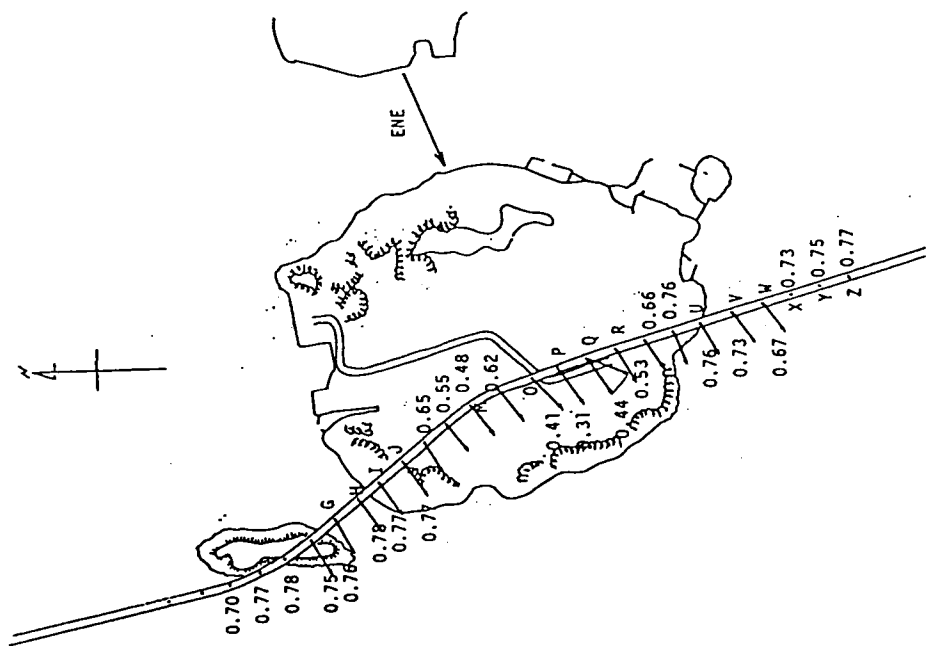


図 5-17 ④ 与島1/2,000 橋面上風向分布
及び規準化風速 (U/U_0) 風向；東北東

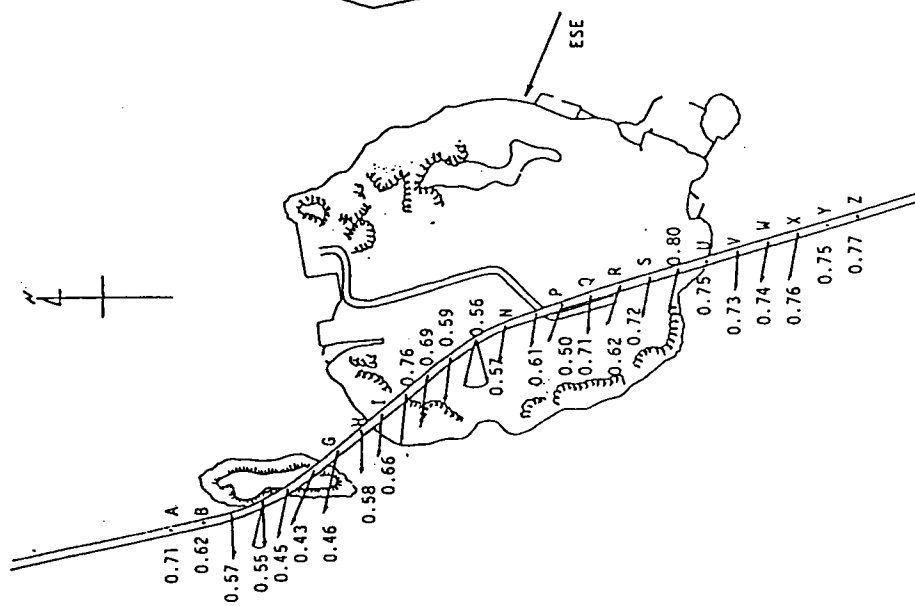


図5-17 © 与島1/2,000 橋面上風向分布

及び規準化風速 (U/U_0) 風向; 東南東

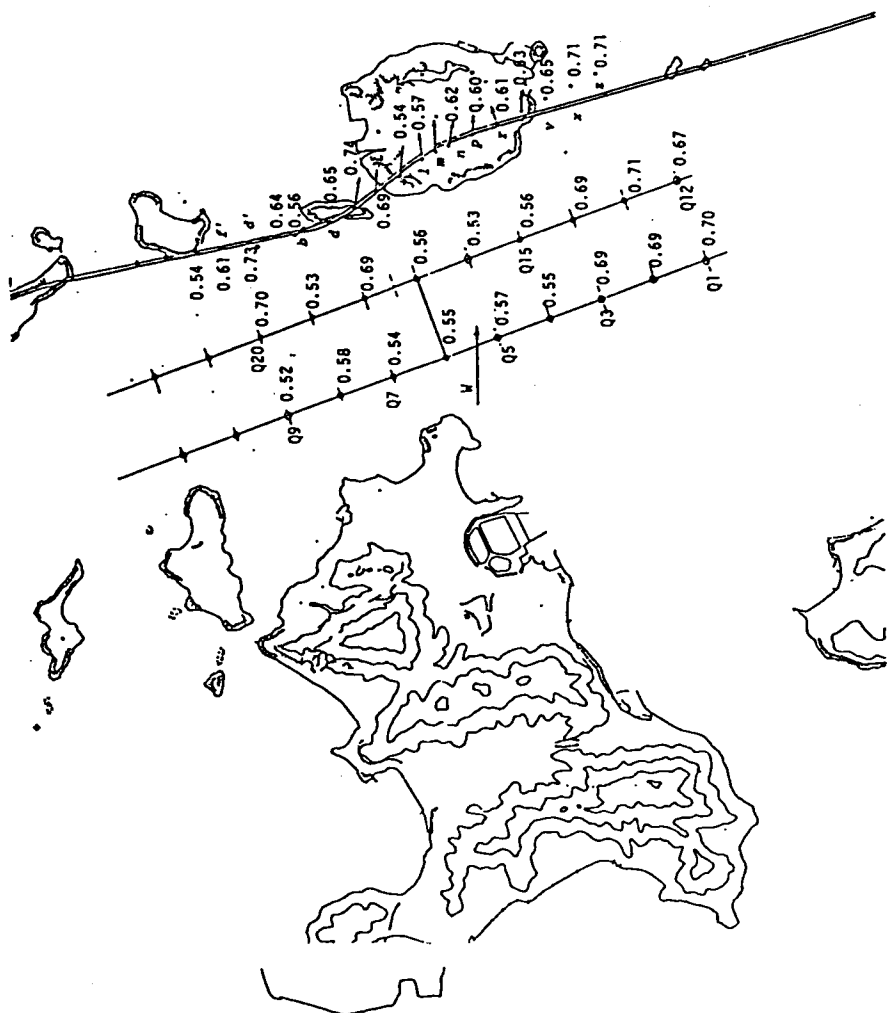


図5-17 @ 1/4,000 与島周辺部風向分布及び規準化風速 (U/U_0) 風向; 西

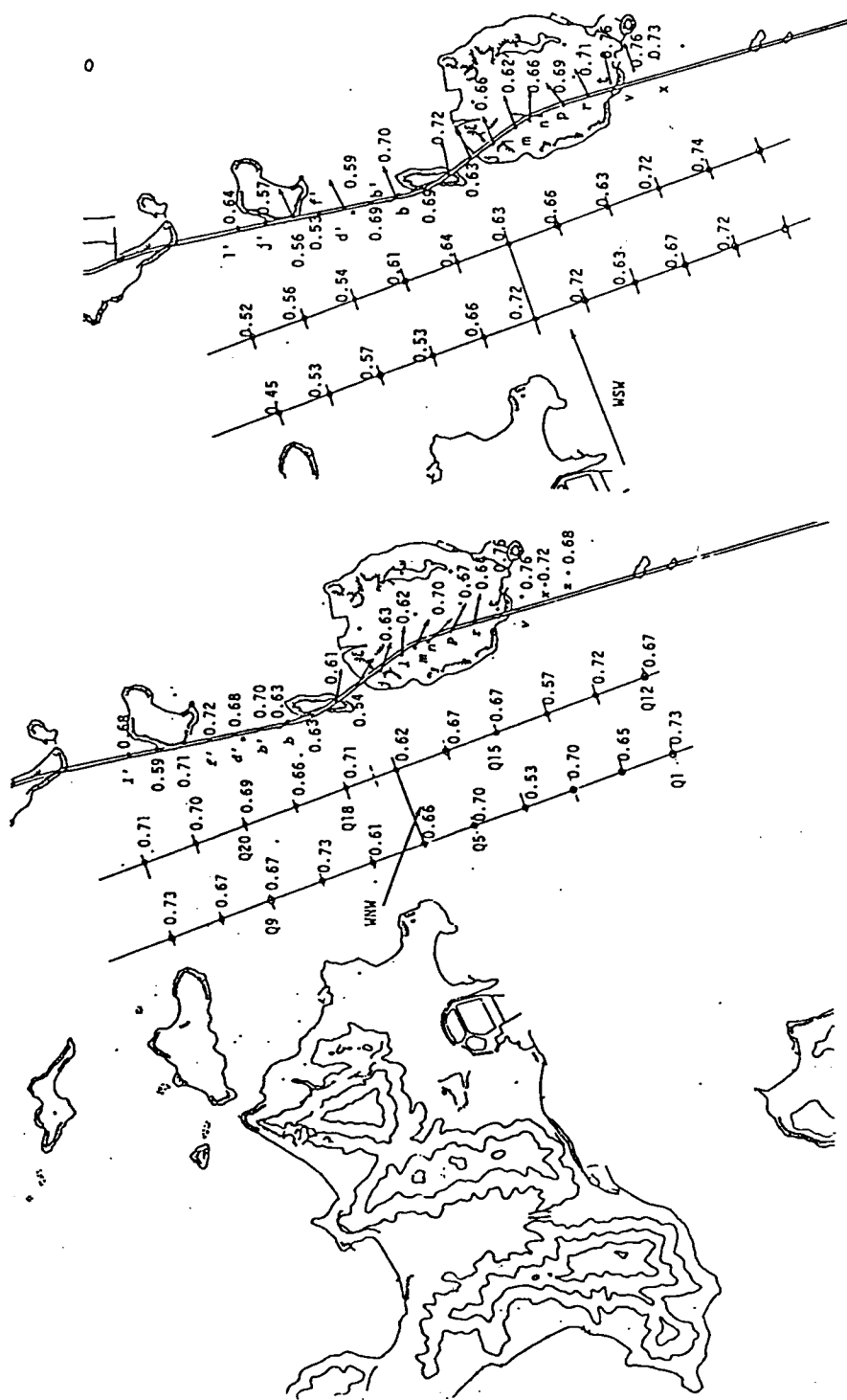


図5-17 ① 1/4,000 与島周辺部風向分布
及び規準化風速 (U/U_0) 風向：西南西

図5-17 ② 1/4,000 与島周辺部風向分布及び規準化風速 (U/U_0) 風向：西北西

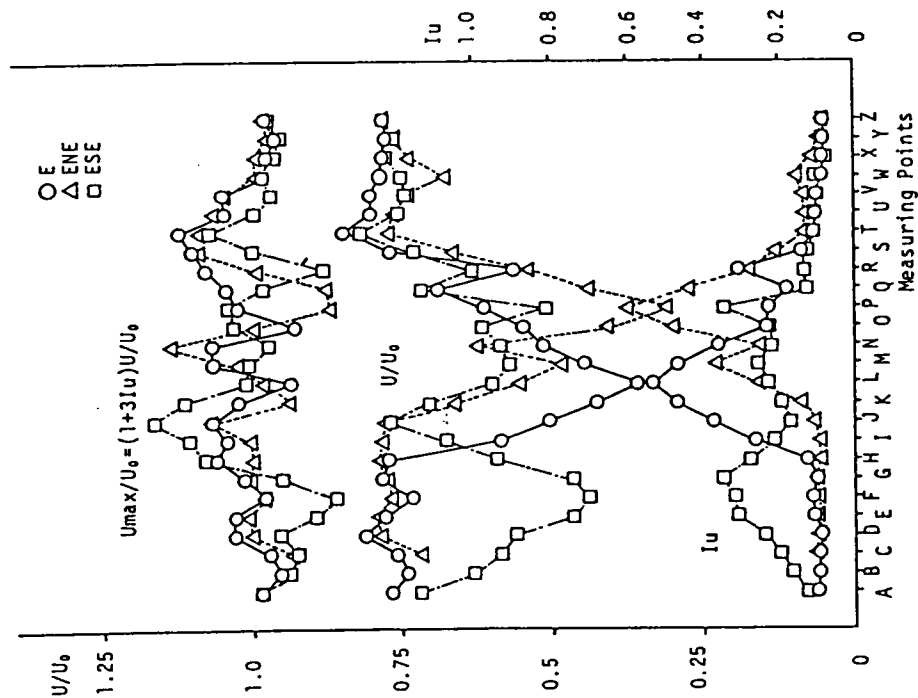


図5-18 ㊸ 東寄りの風における与島周辺部強風分布特性

($U/U_0, I_u, U_{\max}/U_0$)

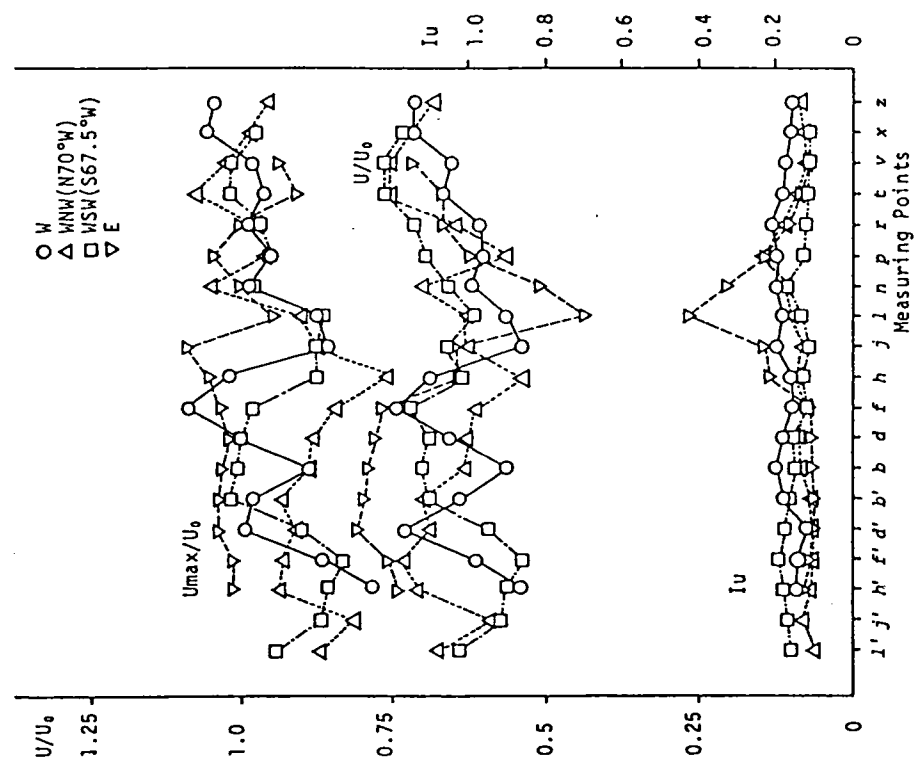


図5-18 ㊹ 西寄りの風における与島周辺部強風分布特性

($U/U_0, I_u, U_{\max}/U_0$)

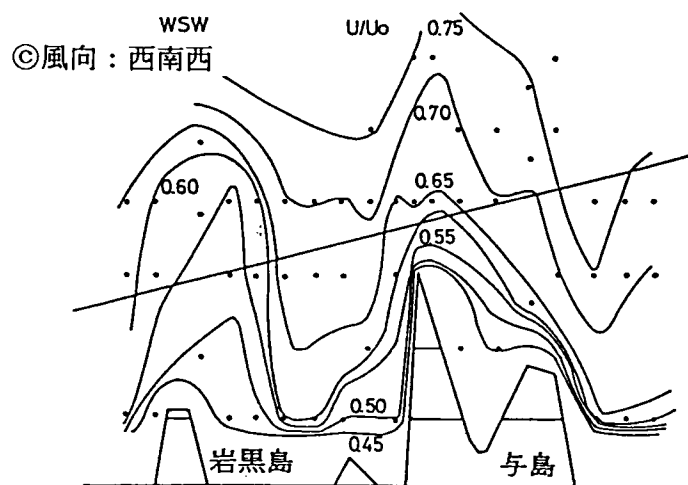
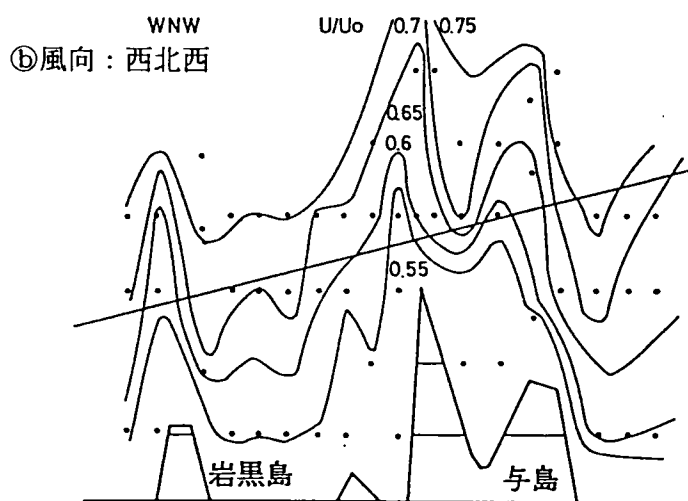
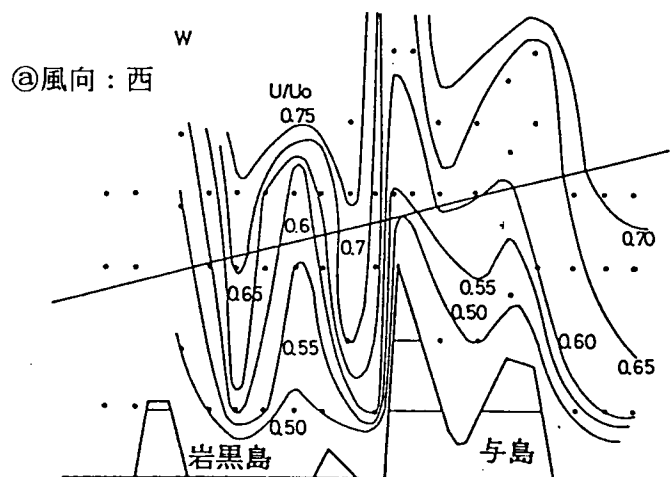


図5-19 与島周辺部ルート横断面風速分布

5-3-4 風洞実験の妥当性

ここでは、縮尺地形模型による風況推定の妥当性について、5-3-2項において簡単に報告されているルート橋梁上の冬期における風観測結果と実験結果の対応関係について検討を加える。まず、現地観測点と風洞実験測点の対応関係は次のようである。与島上測点Aは、1/2,000 模型のM点、1/4,000 の模型のlとnの中間点（すなわち測点m：風向のみ測定）にほぼ対応し、岩黒橋中央部測点Bは、1/4,000 与島周辺模型のd'点に近い測点となっている。また、下津井大橋上の測点Dは縮尺1/3,000 の下津井周辺地形模型の測点19とほぼ対応している。

現地観測における各測点の風配図（図5-9）より、与島上測点Aでは西南西の頻度が非常に小さく西と西北西で50%以上となり、岩黒橋上測点Bにおいては、西から南西までの出現頻度が高く、平均風速も高くなっている。実験では、与島上測点Aに対応する測点mでは、西南西の風向時には周辺地形の影響を受けて西風が作用し（図5-17㊦）、上空風向が西南西であってもA点では西風が観測されることが予想され、現地観測結果と良い対応を示している。また、前掲の図5-18に示したd'点（ほぼ測点Bに対応。）の風速に注目すると、西、西北西で強く、西南西は本島の後流域に位置し弱風となっている。

しかし、d'の南側隣接測点は、本島を周り込む風による強風域に位置している（図5-19(c) 参照）。従って、南西風に関する調査は行なっていないものの、本島の側面を通過する風がB点に作用すると考えられ、観測結果に現われるように南西風も比較的強くなることが予想できる。また、上空風向が西南西時における本島の後流の境界線上付近となるd'点の風速は、上空風向の微細な変化、測定位置等によって、後流の中に入ったり、外に出たりすることが予想される。従って、西或は南西風より低風速となることもありうると考えられ、現地観測結果と良い対応関係にあると判断できる。

最後に、強風観測記録（図5-20、図5-21）と本実験より得られた強風特性間の相関性について考察を加える。図5-20は10分毎の瞬間最大風速の変化を示したものであるが、以下のような点が特徴的である。まず測点Aの風向は他の測点により西に偏り、且つ風速値が他測点の値より大きくなり、測点Dの値が最小となる。この観測時の風向は南西または西南西であると考えられるが、前述のように模型実験では、この風向における与島上測点Aは与島の地形の影響を受け風向が西に偏り、岩黒橋上中央部測点 d'（観測点B）に作用する風より強いこと、また、西寄りの風向における各測点の無次元化風速をまとめた表5-8より明らかなように、下津井大橋上の測点Dに対応する測点の無次元化風

速値が西南西の風向において最小値を示し、観測記録と一致した傾向が得られている。

図5-21は、1時間毎の強風観測結果（10分間平均風速・風向）であり、地点Aで最高風速を記録した後、風向が西南西から西及び西北西へと変化すると、地点Bの最大風速値が最大（地点Cとほぼ同じ値）となり、地点Dの値も地点Aと同等か少し強めとなっている。この結果は表5-8に示す風洞実験結果と同様の傾向である。

以上のことから判断すると、縮尺地形模型を用いた風洞実験の妥当性が得られたものと考えられる。

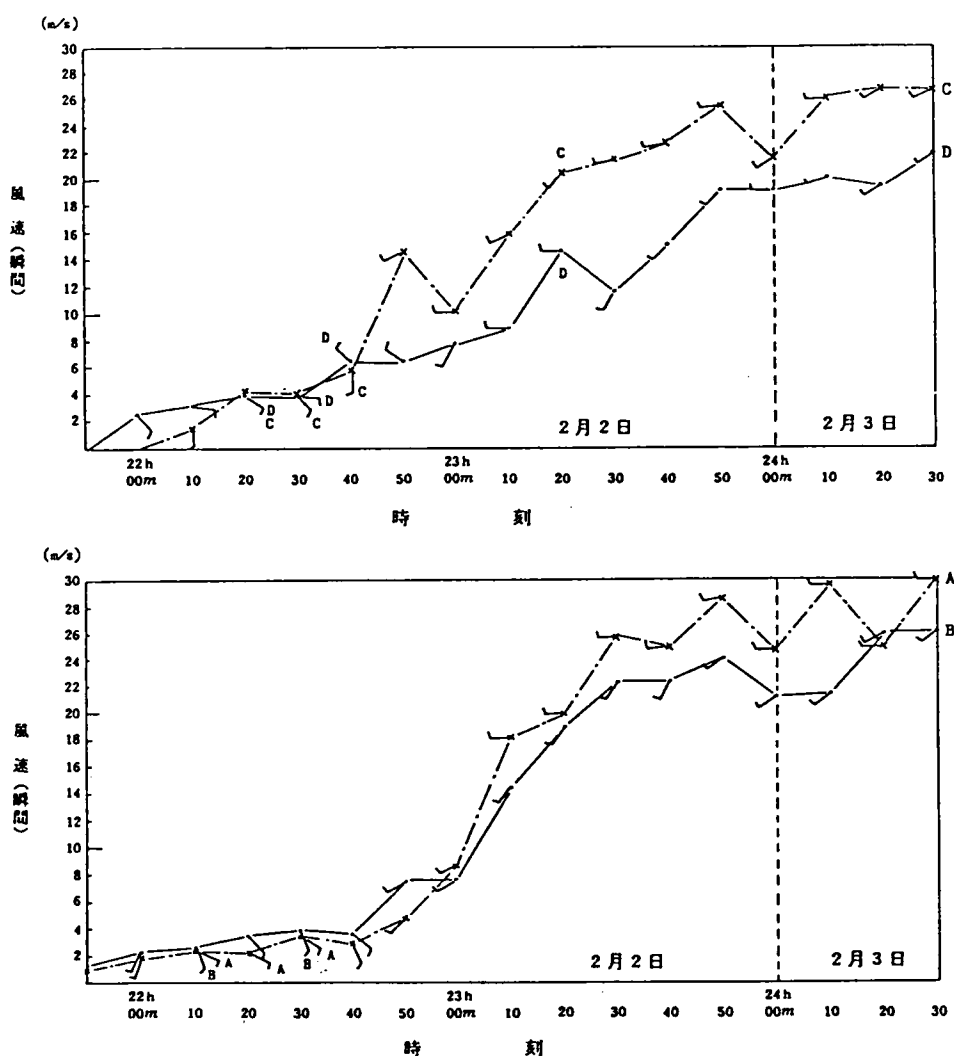


図5-20 地点別10分間毎の瞬間最大風速及び風向の変化

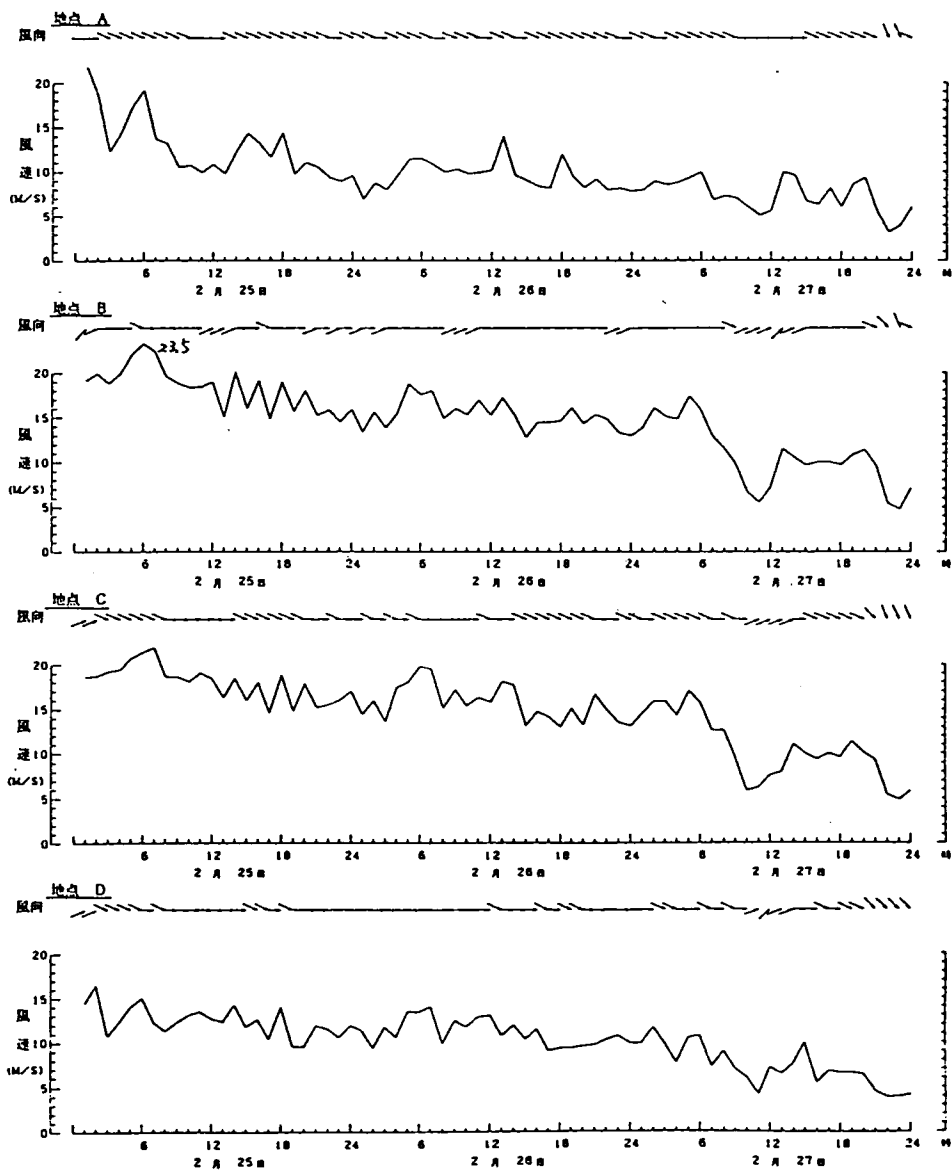


図5-21 1時間毎の10分間平均風向風速記録⁵⁻⁵⁾

表5-8 模型実験における各測点の風速値 (U/U_0)⁵⁻⁵⁾

測点	1 A n	d' B	19; D	12
西	0.57 0.62	0.73	0.53	0.64
西北西	0.62 0.70	0.68	0.63	0.61
西南西	0.62 0.66	0.59	0.50	0.58
平均値	0.60 0.66	0.67	0.55	0.61

5-4 結言

本章においては、本州四国連絡橋児島坂出ルート周辺部及び大鳴門橋周辺部の両海峡周辺部における風況特性の調査によって、海峡部の風況特性に及ぼす局所地形の影響を明らかにすることを目的としており、得られた結果を要約すると以下のようなものである。

- ①海峡部に細長く伸びる岬上（門崎）の風速は、岬を越流或は迂回する流れの影響を大きく受け、観測される風向は、海峡部と若干異なり、岬と直交するように偏る傾向があり風速値も増速されている。また、岬先端部周辺における風向・風速も岬自身の影響を大きく受け、作用する風向によって風向・風速が大きく変化することが大鳴門橋上における現地観測並びに鷺羽山周辺部（下津井瀬戸大橋）を対象とした縮尺地形模型実験より明かとなった。
- ②海峡部に存在する島の海峡部の風況特性に及ぼす影響として、島を気流が越流・迂回することに起因する増速効果、島の形状に起因して観測される風向が偏る現象等が挙げられる。
- ③また、海峡部の上流側の島・山等の海峡部の風況特性に及ぼす影響は、非常に大きく、島・山等の後流部に生じる減速効果のみならず、地形によっては、逆に、気流を収束させる効果を及ぼし、測定高さの影響より大きい効果を有すること（測定高度が80m程度（140mと60m）異なる場合においても、上流側の島による気流の増速効果によって、測定高さの低い測点の風速が大きくなる。）も得られている。
- ④さらに、海峡部の風況特性とは無関係であるが、切通し状及びV字谷状地形における気流の収束による増速効果も認められた。

このような局所地形による増速或は減速効果の存在が明らかとなったが、局所地形の風況特性に及ぼす影響を定量的に評価することが必要であり、次章以下に、単純化地形模型を用いた風洞実験によって、局所地形と増速・減速率の対応関係について詳細に調査し、定量的評価を試みる。

第6章 丘状地形における風況特性

6-1 概説

従来の研究にも示したように、風況特性に及ぼす地形の効果について最も調査・研究されている地形として、本章で対象としている丘状地形が挙げられる。⁶⁻¹⁾ 丘状地形は、その形状の簡単さから数値解析並びに地形模型実験等に基づき、局所風況特性に及ぼす影響として、気流の収束効果による増速率の予測式が提案されている。^{6-2), 6-4)}

そして、これらの提案式は、図6-1(a)に示されるように、丘頂上部において剥離の生じない非常になだらかな形状の丘が主たる対象であり、剥離を伴うような急峻な丘については、図6-1(b)に示すように丘の上流側法面上に死水域が生じ、この死水域上に自由流線が形成されることによって、剥離を伴う丘周辺の流れのパターンが剥離を生じない限界の法面勾配を有する丘の周りの流れと等価になるという仮定に基づき、限界法面勾配以上の丘頂部の増速率は法面勾配に無関係に一定となるとしている。⁶⁻⁴⁾

しかし、我国に多く見られるような急峻且つ複雑な形状を示す丘周辺の風況特性は、前章の与島周辺部の現地観測並びに縮尺地形模型を用いた風洞実験結果に見られるように、地形の影響を大きく受けることが明らかであり、提案された増速予測式の直接的な適用には、種々の問題が生じる可能性があると考えられる。

そこで、本章においては、急峻且つ複雑な形状を示す丘に対する増速予測式の妥当性並びに適応範囲等について単純化された2次元丘状地形模型及び複雑な地形を有する地形模型を用いて調査し、より合理的な増速予測式の確立の一助を成そうとするものである。

6-2 増速予測式 (ESDU) の概略⁶⁻²⁾

まず、本章で検討した増速予測式 (ESDU) について簡単に説明を加える。

任意地点に作用する風は、地表面からの高さ、周辺部の地表粗度、上流側の地表粗度及びその吹送距離、さらに、周辺の局部地形 (丘、盛土、崖等) によって影響を受けると考え、これら因子の風速に及ぼす影響を風洞実験及び解析的な研究に基づき評価式を作成している。

地表粗度は、表 6-1 に示すように、代表的な 7 つの地形条件に大別 (市中心部において $Z_0 = 0.7\text{m}$ ~ 開けた草原では $Z_0 = 0.003\text{m}$) されており、対象地域を目視することにより粗度長 (Z_0) が内搜できるように与えている。

また、風速の評価時間と地表粗度 (Z_0) 及びその継続長さについても、評価式並びにその大まかな推定値が作表されており、内搜によって地表粗度の風速に及ぼす効果が得られるようになっている。

ところで、地形形状の風に及ぼす効果については、図 6-2 に示すような丘又は尾根と傾斜地及び崖状地形に対して気流の鉛直方向への収束効果による増速率を推定している。

地形形状による増速は、他の要因 (主として地表粗度) によって決まる接近流速との積として評価される。

$$V = K_L \cdot V_z \quad (6-1)$$

ここに、 V : 地形形状の影響を考慮した風速の推定値

V_z : 地表面粗度、風速評価時間等による風速の推定値

(地形形状の影響のみが考慮されていない風速の推定値)

K_L : 地形形状によって決まる増速率

そして K_L は上流側法面勾配 (Ψ)、注目点の頂上部に対する位置関係 (X_L : 頂上部が $X_L = 0$ 、下流側 $X_L > 0$ 、上流側 $X_L < 0$) 及び地表面からの高さ (Z) の関数として与えられており、次のように定義される。

$$K_L = V/V_z = 1 + 2 \cdot S \cdot \Psi \quad (6-2)$$

ここに、 S : 地形影響係数 (Topographic Factor、図 6-3 に与えられている。)

Ψ_e : 換算法面勾配であり、法面勾配によって次の場合分けをしている。

$\Psi_e = \Psi = H/L$ — 剥離を伴わないなだらかな丘 ($\Psi < 0.3$)

$\Psi_e = 0.3$ — 剥離を伴う急峻な丘 ($\Psi > 0.3$)

剥離を伴う場合に $\Psi_e = 0.3$ と一定値を与えているのは、前述のように上流側法面上（上流側尾根裾）に渦領域（図6-1）が形成され、その上を自由流線が流れると考えているからである。すなわち、上流側の法面勾配が限界値（ $\Psi = 0.3$ ）以上になると、上流側法面上に渦領域が生じ、自由流線の流れる傾斜は常に一定にコントロールされると考えているからである。⁶⁻⁴⁾

また、地形影響係数 S (Topographic Factor) の近似式は以下のように示されており、本研究ではこの式を使用した。図6-2(a)に示される丘及び尾根に対して、

$$S = 1 / (a + 6.2 \cdot Z_1^{3/2}) \quad \text{or} \quad 1 \quad (\text{両者のうち小さい値}) \quad (6-3)$$

$$\text{ここに、} \quad \left. \begin{array}{ll} a = 0.9 + 9.8 X_1^2 + 2.3 X_1^4 & ; \quad X_1 \leq 0 \\ a = 0.9 + 1.1 X_1 + 4.2 X_1^2 & ; \quad X_1 \geq 0 \end{array} \right\} \quad (6-4)$$

$$X_1 = X_L / L_e - b_1, \quad (6-5)$$

$$b_1 = 0.3 (1 - \exp(-0.4 (Z/L_e)^3)), \quad (6-6)$$

$$Z_1 = Z / L_e. \quad (6-7)$$

L_e : 換算底面長

$$\left. \begin{array}{ll} L_e = L, & \Psi_e = \Psi \quad ; \quad \Psi \leq 0.3 \\ L_e = 3.33 H, & \Psi_e = 0.3 \quad ; \quad \Psi \geq 0.3 \end{array} \right\} \quad (6-8)$$

また、図6-2(b)に示される傾斜地及び崖状地形に対しては、

$X_L / L_e < 0$ のときには、式(6-3)～式(6-8)を使用し、

$X_L / L_e > 0$ のときには、以下の式を用いる。

$$S = 1 / (c + d \cdot Z_1^{3/2}) \quad \text{or} \quad 1 \quad (\text{両者のうち小さい値}) \quad (6-9)$$

$$\text{ここに、} \quad c = 0.9 + 1.67 X_2 + 1.2 X_2^2 + 0.44 X_2^3 \quad (6-10)$$

$$X_2 = X_L / L_e. \quad (6-11)$$

$$d = 6.2 + 2.32 X_2 \quad (6-12)$$

$$Z_z = Z/L_e - b_z \quad (6-13)$$

$$b_z = 0.24 X_2^{0.24} \quad (6-14)$$

また、 $X_L/L_e > 0$ 且つ $Z_z < 0$ ときには、以下の式を用いる。

$$S = 1 / (0.9 + A \cdot X_2 + B \cdot X_2^2 + C \cdot X_2^3) \quad \text{or } 1 \text{ (両者のうち小さい値)} \quad (6-15)$$

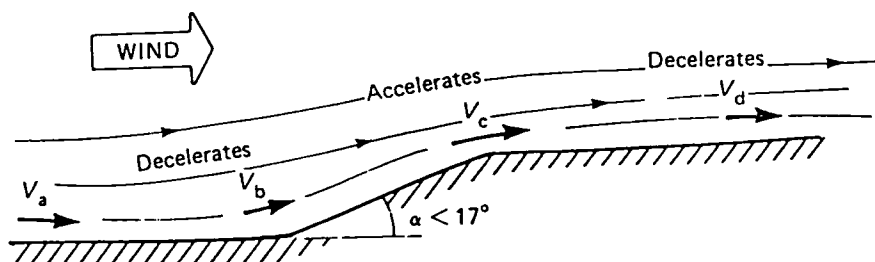
$$\text{ここに、} A = 1.67 - 0.71 Z_z / b_z \quad (6-15)$$

$$B = -1.2 - 3.18 Z_z / b_z \quad (6-16)$$

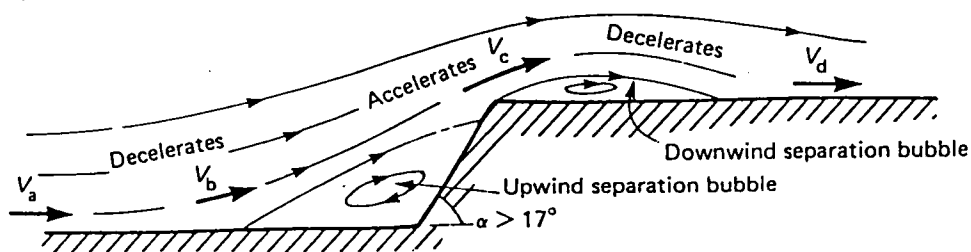
$$C = 0.44 + 1.13 Z_z / b_z \quad (6-17)$$

表6-1 代表的粗度長 $z_o^{6-2)}$

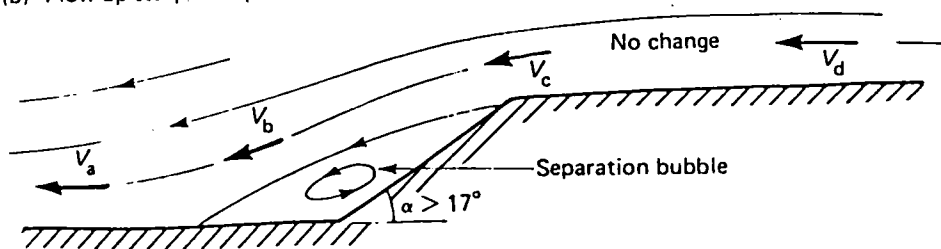
代 表 的 地 形 条 件	粗 度 長
大都市中心部	0.7
中小都市中心部	0.3
市街地域	0.3
都市郊外	0.1
代表的な開けた農園地域	0.03
建物のまばらな平野部	0.001
開けた草原	0.003



(a) Flow up shallow escarpment



(b) Flow up steep escarpment



(c) Flow down steep escarpment

図 6 - 1 斜面上の風況特性⁶⁻⁴⁾

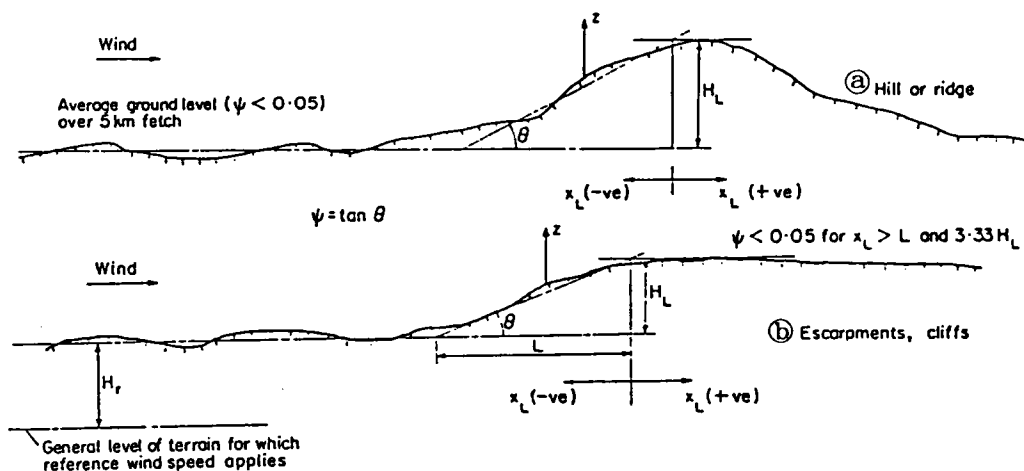


図 6 - 2 地形形状の概略⁶⁻²⁾

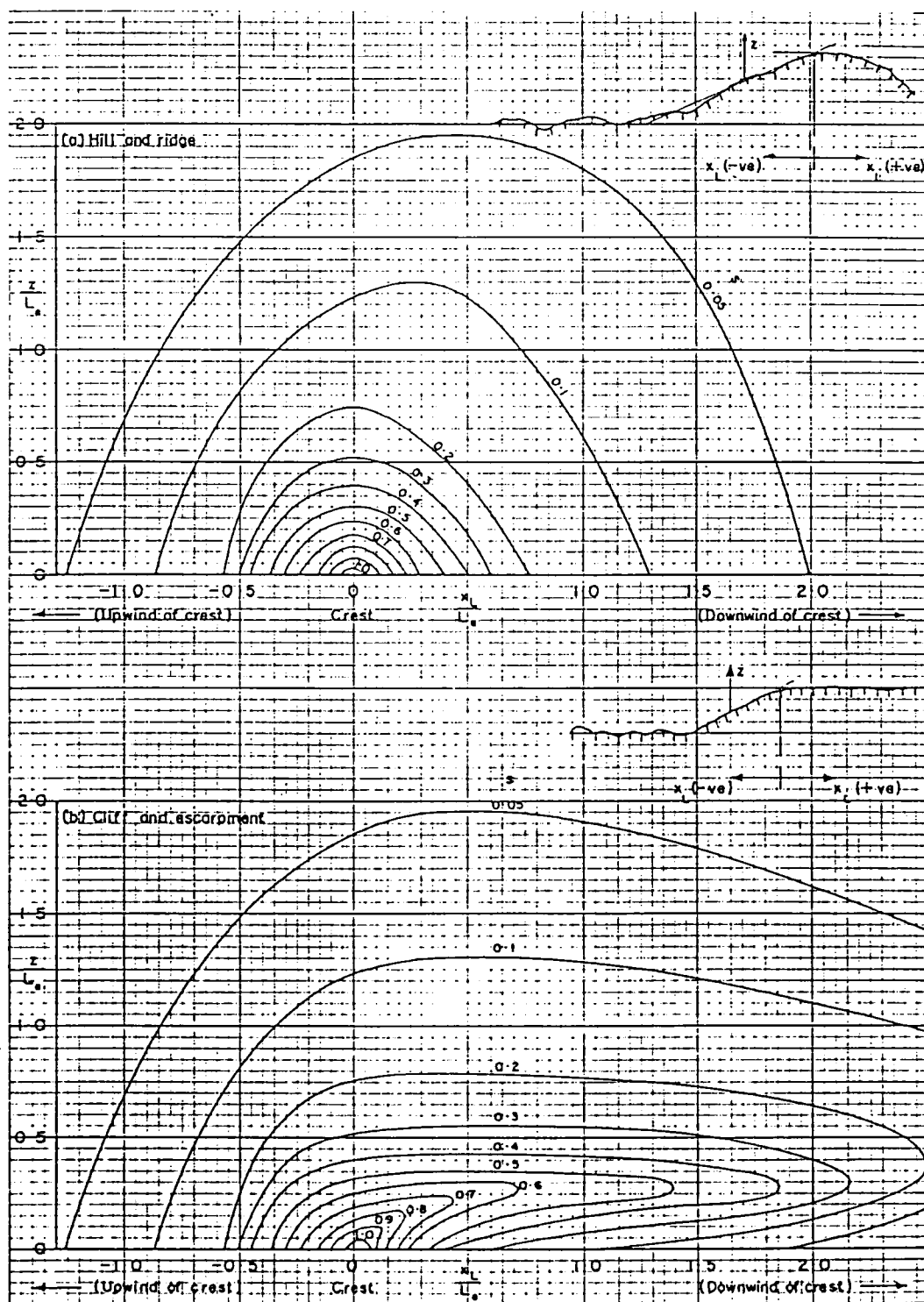


圖 6-3 地形影響係數 Topographic Factor S^{6-21}

6-3 2次元丘状地形における風況特性

比較的なだらかな法面勾配から急峻な法面勾配を有する台形断面（表6-2、図6-4）を用いて単純化した2次元丘を製作した。

表6-2 2次元丘断面諸量

モデル	模型高さ H (cm)	法面部底辺長 L (cm)	全底辺長 B (cm)	法面勾配 Ψ (deg)
A	5	3.5	11	55
B	5	5	14	45
C	5	8	20	32
b	3	5	14	31
c	3	8	20	21

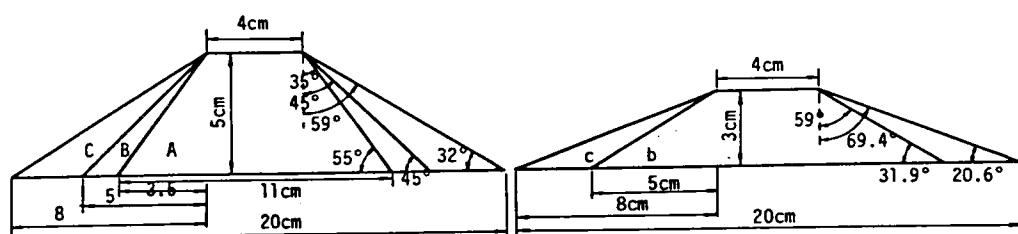


図6-4 模型断面形状

まず、この2次元丘周辺の流況特性を図6-5に示す。風速は上層風速（境界層外の風速：風洞設定風速）で無次元化した値であり、接近流は、2-3節に示したように、スパイヤーとラフネスブロックによってべき指数 α が、約0.15の境界層乱流を用いている。図より、丘の法面勾配が大きくなると、丘の下流側に生じる後流域が広がり自由流線の上流側法肩からの剥離する角度も大きくなっている。このことより、法面勾配は剥離の有無或は剥離が生じた場合の剥離の強さ、丘の背面圧力の低下等の2次元丘周りの風況を支配する重要なパラメータであることが判断できる。

また、法面勾配が類似し、高さの異なる(c) (d) 図を比較すると、下流側において、模型高さの低い(d) 図の方が風速の回復が早まっており、丘の高さも2次元丘周辺の流れを支配する1つのパラメータであると考えられる。

図6-6は、丘周辺の乱れの強さの分布を示したものである。風速が増速される領域で乱れの強さは、減少し、丘の後流等風速が減少する領域で大きな値となっている。そして、後流中の乱れの強さの分布は、丘の直背後及び剥離流の地表面への再付着点の内側で大きくなることが明らかである。

表6-3及び図6-7は、2次元丘の上流側法肩部における増速率 ($A_z=U(Z)/U_\infty(Z)$ 、すなわち、ESDUに示される増速率 K_L と同一の定義になっている。)を示したものである。図中、実線がESDUによる推定値、破線は同様にDavenport等⁶⁻³⁾による推定値である。両提案式の各模型に対する推定値がそれぞれ等しくなるのは、前節に示したように、法面勾配が大きくなり上流側法肩から剥離を生じるようになると、上流側法面上に渦が形成され、剥離の生じない限界値 (ESDU: $\Psi_{cr}=0.3$ 、Davenport: $\Psi_{cr}=0.25$) 時の流れのパターンと一致すると考えていることによる。しかし、本実験による限界勾配以上の法面勾配を有する2次元丘頂部の増速率は法面勾配に明らかに依存し、法面勾配の増加に伴って増速率は減少し、Pearse, Lindley, & Stevenson⁶⁻⁵⁾の実験結果 (三角形状丘における増速率は、法面勾配の増加とともに大きくなるが、ある角度以上の傾斜になると増速率は低下する。)と一致している。また、地表面からの高さが低い場合、ESDUの推定値は、法面勾配の比較的小さい (ただし、限界勾配より大きい) 丘に対しては、明らかに過小評価となり、測定高さが高くなるとほぼ妥当な推定値となっている。

一方、Davenport等による推定値は、今回実施した測定高さにおいては各模型の増速率の最大値を予測する結果となり、設計面から考えると安全側であるが時として風速値を過大評価することが予想され、経済性の面で問題となる可能性もある。

そこで、各模型における増速率をより精度よく推定するために、限界法面勾配以上のESDU推定式を以下のように修正し、図6-8 (a) (b)に示した。

$$\text{ESDU推定式} \quad L_* = 3.33H, \Psi_* = 0.3 \quad ; \Psi \geq 0.3 \quad (6-18)$$

$$\text{ESDU修正式} \quad L_* = L, \quad \Psi_* = 0.3 \quad ; \Psi \geq 0.3 \quad (6-19)$$

本修正推定値は、地表面近くの測点ではESDU推定値よりも更に過小評価となり、また全体的に実験値よりも小さい値を示す傾向が認められるが、法面勾配の異なる各2次元丘に対して、ほぼ妥当な推定式となっている。

本修正は、推定式中の換算高度 Z/L_* を Z/L に変更する事により、法面勾配の及ぼす影響を反映させ、図6-3に示される地形影響係数 S (Topographic Factor) の適用範囲を拡大しようとしたものである。しかし、剥離を伴う丘状地形における増速効果と法面勾配の関係については、接近流の鉛直プロファイル、風向、地表面粗度等の及ぼす影響に関して、更に詳細な検討が必要である。

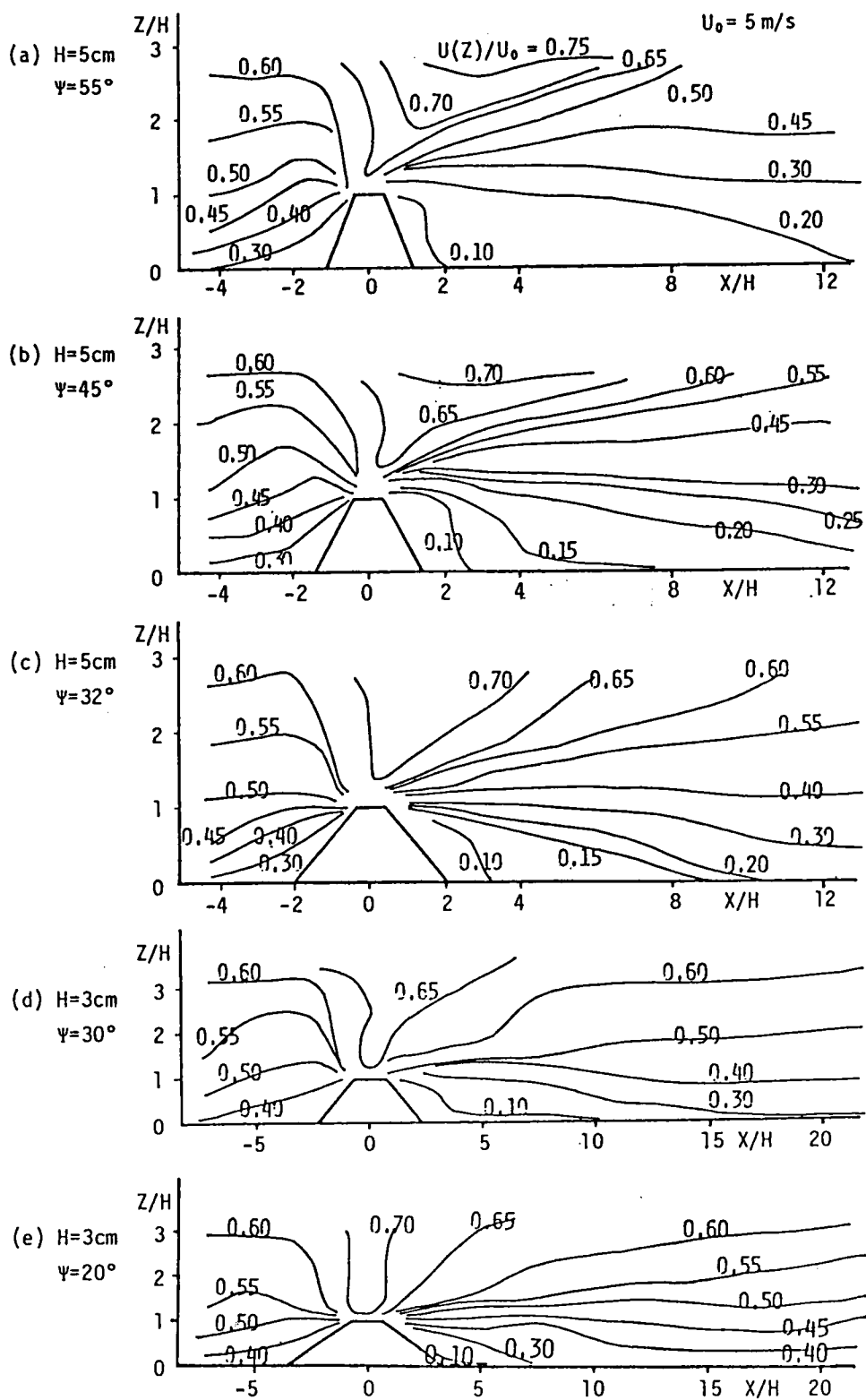


図 6-5 2次元丘周りの風速分布特性

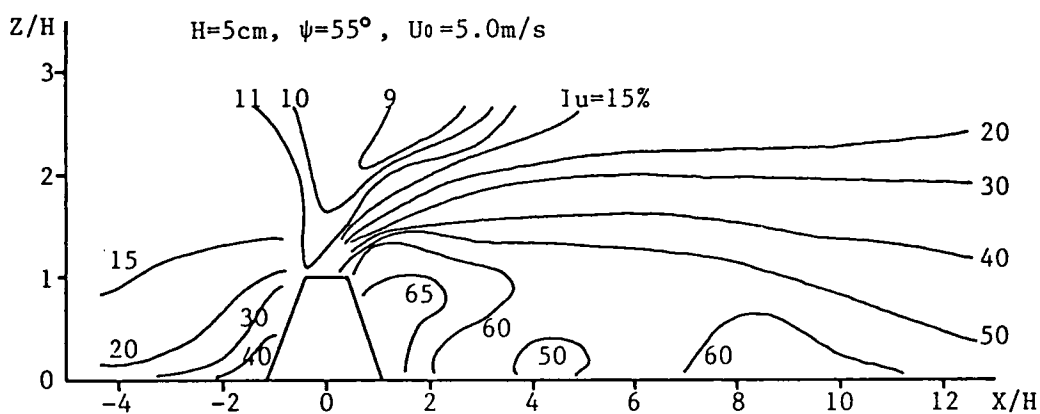


図 6-6 2次元丘周りの乱れの強さの分布特性

表 6-3 2次元丘頂部における増速率: A_z

Z/H	A	C	b	c	ESDU	Davenport et al
	H = 5cm $\psi = 55^\circ$	H = 5cm $\psi = 32^\circ$	H = 3cm $\psi = 30^\circ$	H = 3cm $\psi = 20^\circ$		
0.1	1.53	1.90			1.6	2.00
0.17			1.77	1.79	1.58	1.90
0.3	1.25	1.41			1.53	1.77
0.5	1.20	1.32	1.34	1.46	1.46	1.61
0.8	1.13	1.23	1.26	1.38	1.37	1.45
1.33			1.19	1.30	1.24	1.29
1.5	1.12	1.18			1.21	1.25
2.5			1.13	1.24	1.13	1.14

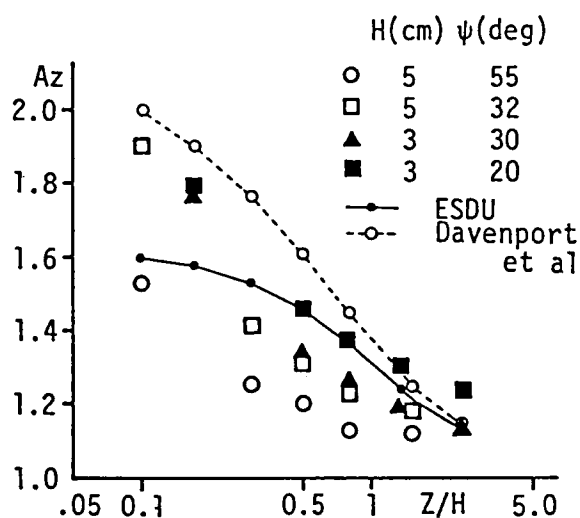


図 6-7 2次元丘頂部における増速率: A_z

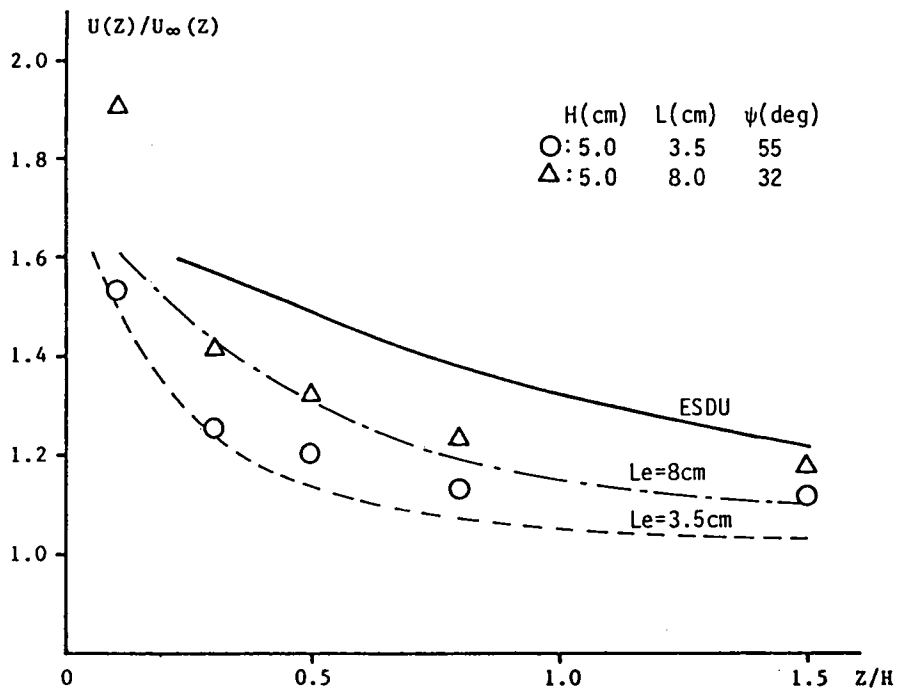


図 6-8 ㊸ 2次元丘頂部における増速率 A_z と修正 ESDU 式 ($H=5$ cm)

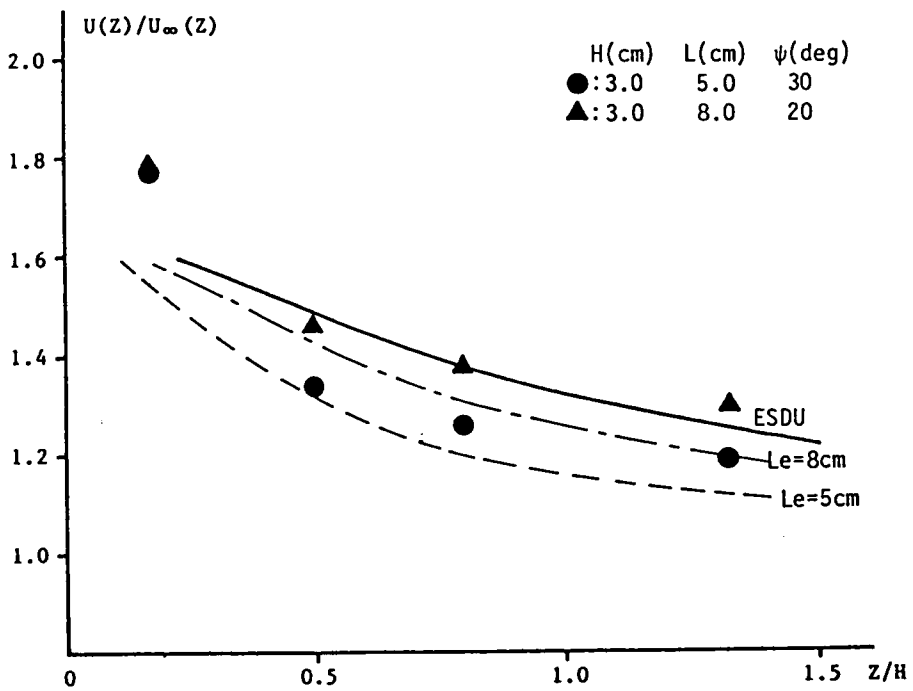


図 6-8 ㊹ 2次元丘頂部における増速率 A_z と修正 ESDU 式 ($H=3$ cm)

6-4 複雑な形状の丘における風況特性

本節で対象とした複雑な形状の丘状地形として、本州四国連絡橋児島・坂出ルート周辺の鷺羽山の尾根筋、櫃石島及び与島を選定した。鷺羽山並びに櫃石島は、縮尺1/3000とし、与島は、縮尺1/2000の模型を作成した。各地形模型上の風速測定点を図6-9に示す。風洞実験に使用した風洞気流特性は、2-3節に示したように、べき指数 α の値が約1/7の境界層乱流であり、境界層外の風速を、それぞれ、約3.5m/s、4m/sとして実験を行なった。

主風向（地形模型設定風向）について各測点周辺の横断地形性状及びESDU推定式を使用する為に必要な地形パラメータ（丘の高さ H 、底面長 L 、法面勾配 Ψ 等）を国土地理院発行の縮尺1/25,000地形図より読み取った。ここに、法面勾配 Ψ は重要な因子であるが、地形が複雑であり、大別して図6-10に示すような決定手法を用いた。Case1は、地形が海に接するまでの長さを L として Ψ を決定する手法であり、単調な地形ではこの手法で十分精度良く決定できる。Case2は、丘の中腹部に別の丘状地形または異なる尾根筋が存在する場合に、これらの地形特性を反映させる一手段として、各ピークを連続した仮想の丘が存在する（即ち、谷の部分はWakeとなり、流れは各頂上部を連続した面上に作用すると仮定する。）と考えたものである。また、頂上部が平坦な地形は、丘と考えるより傾斜地或は崖と考えられることより、このような地形に対しては、式（6-9）及び式（6-15）を用いて推定した。

図6-11～13に鷺羽山周辺の尾根筋測点、櫃石島測点及び与島上測点における増速率の実測値とESDUに基づいた推定値 K_L の相関性を示す。図中の記号は、法面勾配 Ψ の決定手法（図6-10参照）及び主風向をパラメータとして示し、各測点番号も併せて示した。

これらの図から、ESDUによる増速率の推定（ K_L ）の妥当性、適用範囲及び問題点を抽出する。ただし、前述のように K_L の推定式に用いた地形データが各測点個々に作用している風向でなく、主風向（風洞内に模型を設置した方向）に対して得られたものであり、測定された風向は必ずしも主風向に一致しないことから、推定された K_L の値には若干の誤差が含まれていることに留意する必要がある。たとえば、鷺羽山周辺部の風向分布は、写真6-1に示されるように、尾根筋では尾根に直交する方向に変化し、また、周辺に3次元的な丘が存在するとその丘を迂回するような流れが発生しており、主風向とは異なった方向に風が作用する測点も存在している。従って、本節では定量的な比較は

問題が多いことより、定性的な傾向を述べるに留める。

各図より明らかなように、E S D Uの推定式は実測値と比較的良好な対応関係があり、複雑な地形に対しても基本的には適用できるものと考えられる。なお、図6-13に示した与島上の測点に対する推定値が過大評価となっているが、これは実験における増速率は全て接近流速に対する比として求めたが、東寄りの風向では、与島の東側の小与島によって与島に作用する風速は低減しており、E S D Uの推定式を適用するためには遮へい物の下流側の風速を用いて増速率を決定する必要がある。従って、与島の東寄りの風向の実測値は小与島の遮へい効果を考慮すると約20～30%程度、実験値の増速率が増加することとなり、E S D Uの推定値と良好な対応関係が得られるようになる。

次に、地形特性の面からE S D U推定式の適用性・問題点について簡単に示す。

まず、測点周辺地形が、図6-14（測点H6（WNW）周辺地形）に示されるように、丘の上流側法面勾配 ψ が、緩やかで（ $\psi < 0.3$ ）比較的に単純な測点に関しては、実験値とほぼ一致した推定値が得られている。（他に、測点42（ENE、E）、53（ENE）、45（ENE）等）

また、山頂における増速率の推定値はENEにおいて過大評価となるが、E及びESEでは、ほぼ実験値と一致している。この差は、実験では、この図の方向から風が作用していない事も一因であるが、前節に示した単純化地形模型において得られた結果と同様に、頂上周辺部の上流側斜面の勾配の差に起因していると考えられる。すなわち、図6-15に示した鷺羽山山頂周辺の横断面形状より明らかなように、ENEにおける上流側の平均的な斜面の勾配も他風向と比較して大きくなっているが、特に、測点近傍の斜面勾配（100m～200m上流側の領域）がENEでは急勾配となっていることに起因しているものと考えられる。そして、この現象は今回調査した丘状地形において、例外なく生じており、[鷺羽山の尾根筋の測点（測点44のE、ENE、測点45の風向E SE及び測点53の風向E）、檀石島上の測点（測点H4の風向W、WSW、測点H5の風向ENE、WSW、測点H6の風向E SE）、及び、与島上の測点（測点Y7、Y8、PAの全風向）]、測点周辺において局所的であっても剥離を伴う流れが発生すると考えられる地点では、E S D Uの推定式は過大評価となる傾向が同われる。

特に、図6-16に示す測点H5の風向WSWでは、斜面勾配 ψ の決定の方法により、推定値が大きく異なっており、複雑な地形をE S D U等に定められた単純形状に変換する際には、特に、注意が必要であることが明らかである。

そして、本節では丘状地形の単純化手法として、2つの極端なケース（図6-10参照、Case 1は丘の頂点と海面との接点を結び、 L 、 Ψ を決定する。また、Case 2は各丘の頂点部を結び、仮想の丘を形成して L 、 Ψ を求める。）を用いたが、斜面勾配が急であり剥離を伴う丘に対しては前述のようにCase 1では過大評価となる。Case 2の推定値はほぼ実験値と対応しており、Case 2に示した地形特性の抽出に基づく推定が妥当であるように思われる。しかし、実際の流れは決してCase 2で仮定したような仮想の丘上の流れではなく、本実験結果と推定値が偶然良い対応を示しているだけであると考えられる。この点についても、今後更に検討する必要がある。

また、3次元的な丘周辺では丘を迂回する流れが生じる（測点H 5（風向E）、測点54（風向ESE）等）が、この流れによる増速効果はESDUでは過大評価となっており、3次元的な丘よりも2次元的な丘の方が増速率が大きい傾向を示している。この原因は丘越えの流れにおける丘頂上部の増速は、鉛直方向への気流の収束であるが、3次元的な流れの場合は、水平方向の流れが生じるため鉛直方向への気流の収束を抑制するからであると考えられ、この現象についても適当な評価式を定める必要がある。

最後に、前節で提案したESDUの修正式の妥当性について検討してみる。

図6-17に斜面勾配が0.3以上のケースのみを抽出し、実験値とESDU及びESDU修正式の相関性を示した。大きく異なっていたESDU推定値は換算底面長 L_e に各測点固有の L を代入することにより、大幅に実験値に近づいており前節と同様に剥離の生じる限界勾配以上の丘頂上部の増速率は修正ESDU式を用いる方が推定精度が向上している。しかし、この修正は流体力学的な説明が付けられず、今後この点に注目した研究を行う必要がある。

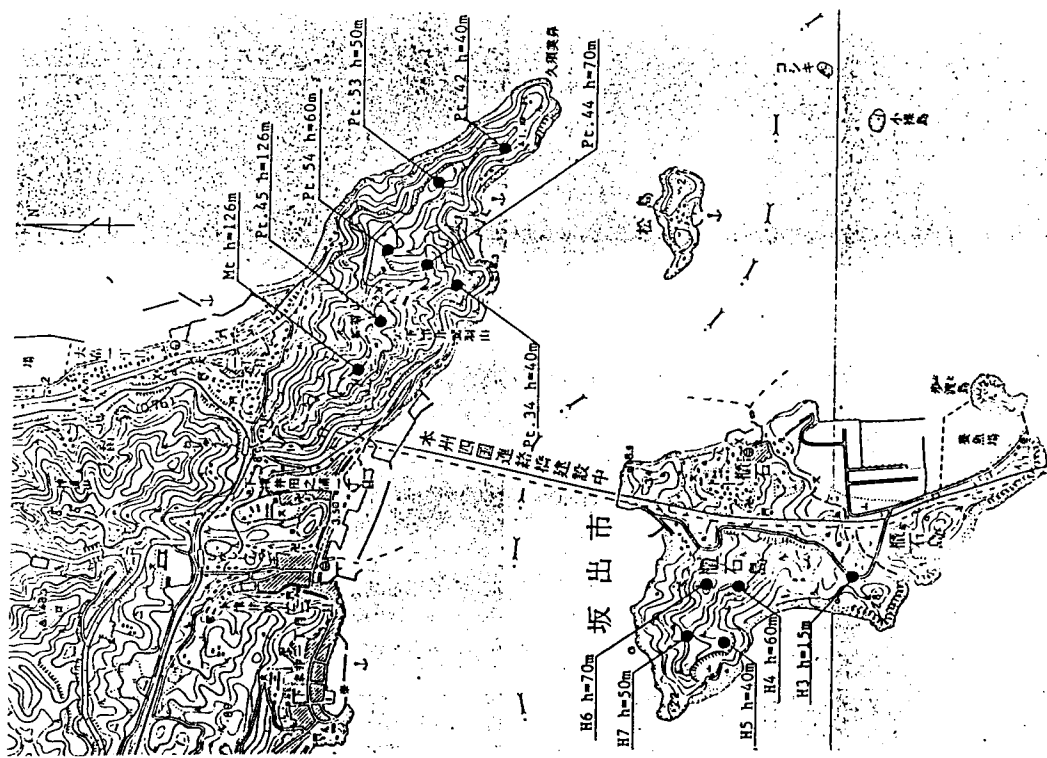


図 6-9 ④ 鷺羽山及び櫃石島風速計測点

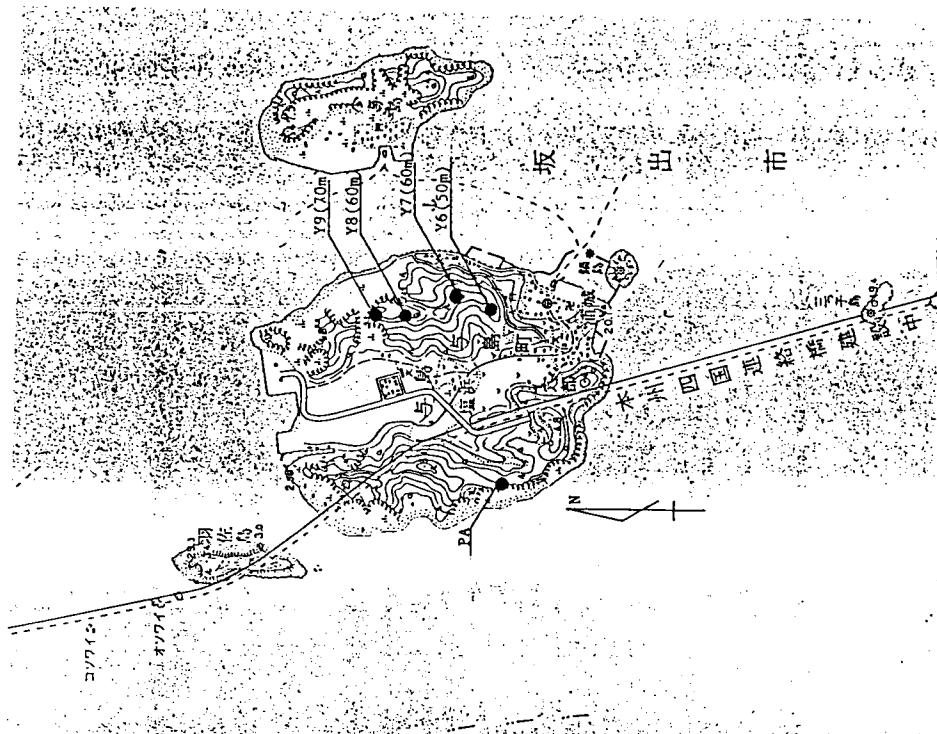
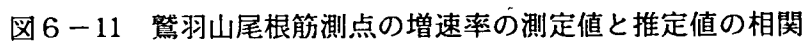
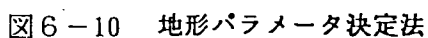


図 6-9 ⑤ 与島上の風速計測点



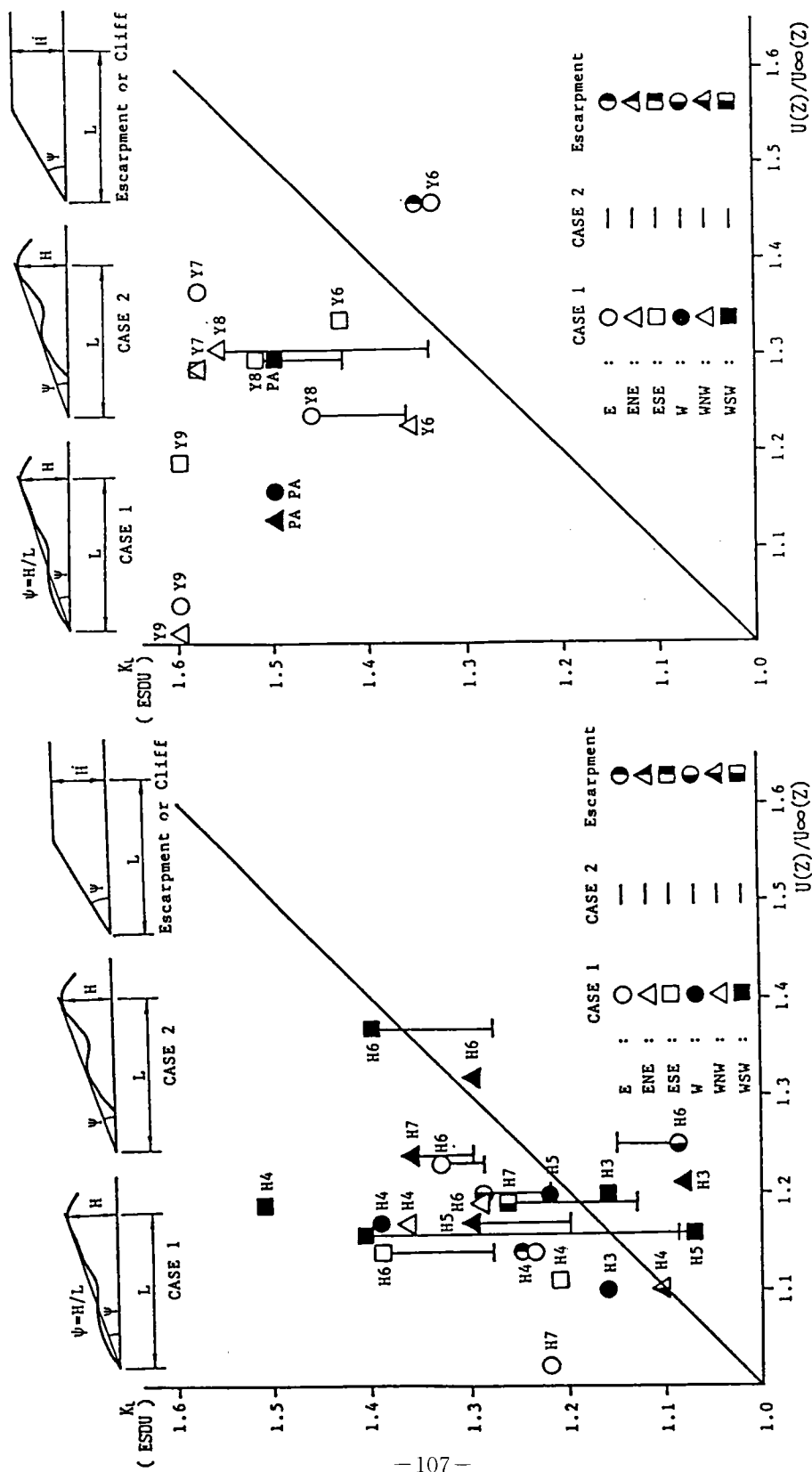
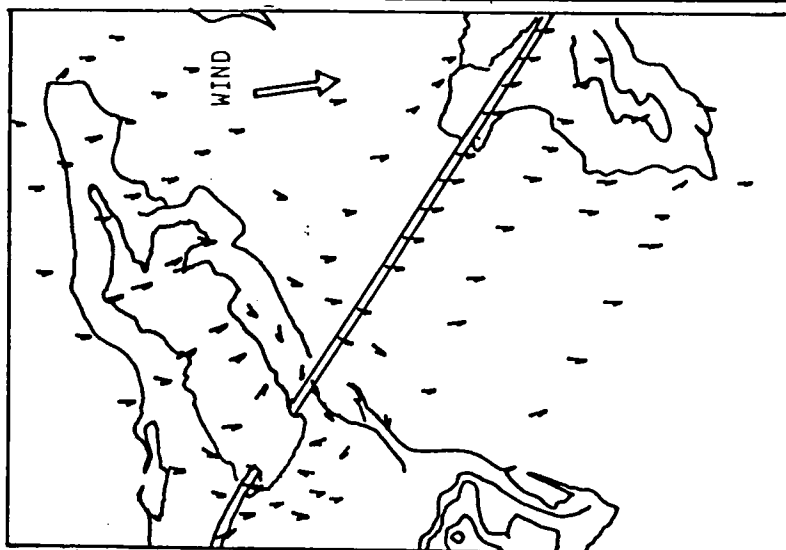
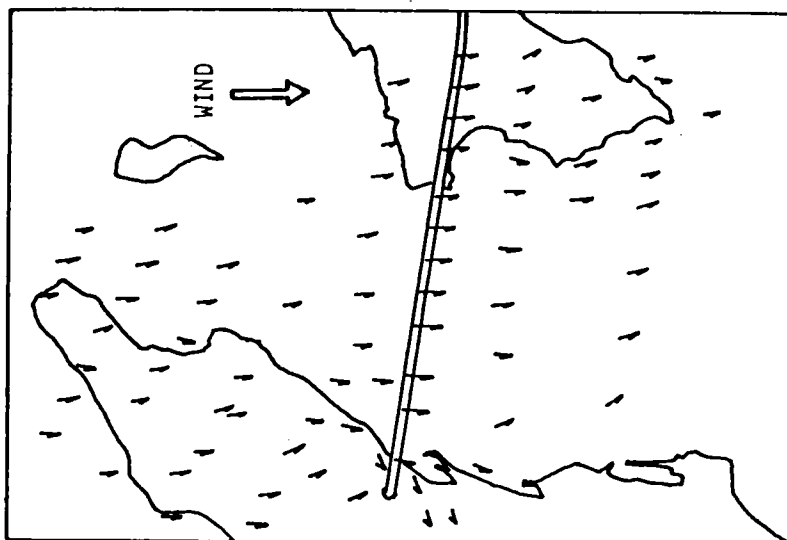


図 6-12 極石島測点の増速率の測定値と推定値の相関

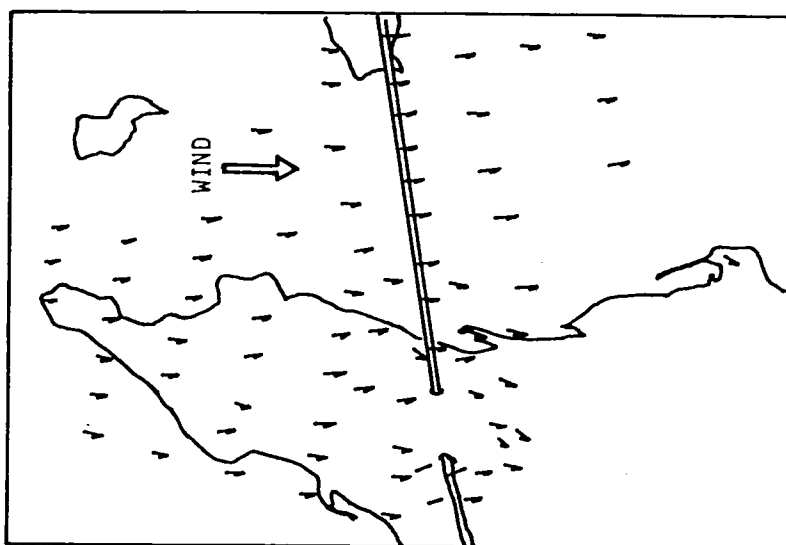
図 6-13 与島測点の増速率の測定値と推定値の相関



③風向：東北東



⑥風向：東



⑨風向：東南東

図6-14 東寄りの風における鷺羽山周辺の風向分布特性

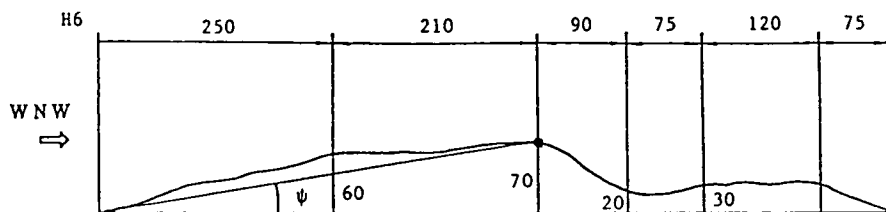


図6-15 櫃石島測点H6におけるWNW方向の横断面図

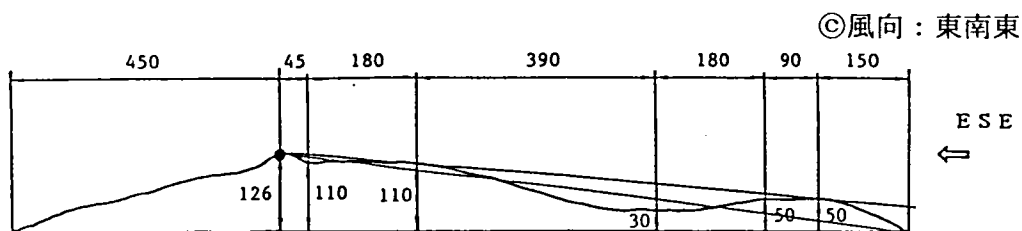
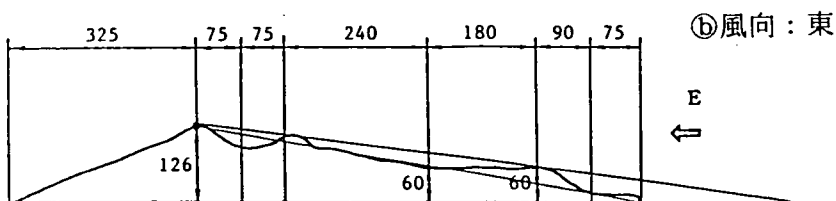
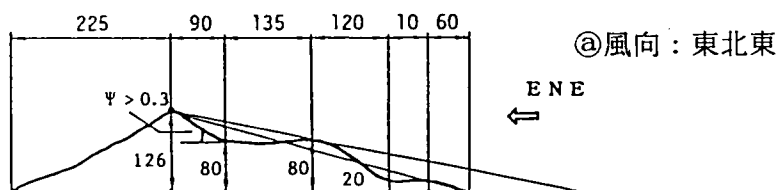


図6-16 鷺羽山頂の横断面図

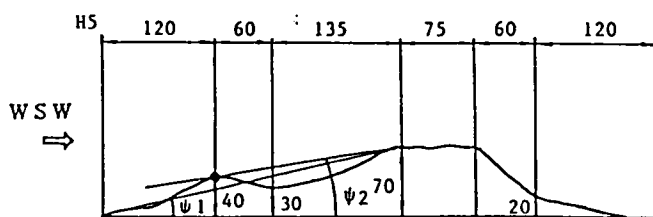


図6-17 櫃石島測点H5におけるWSW方向の横断面図

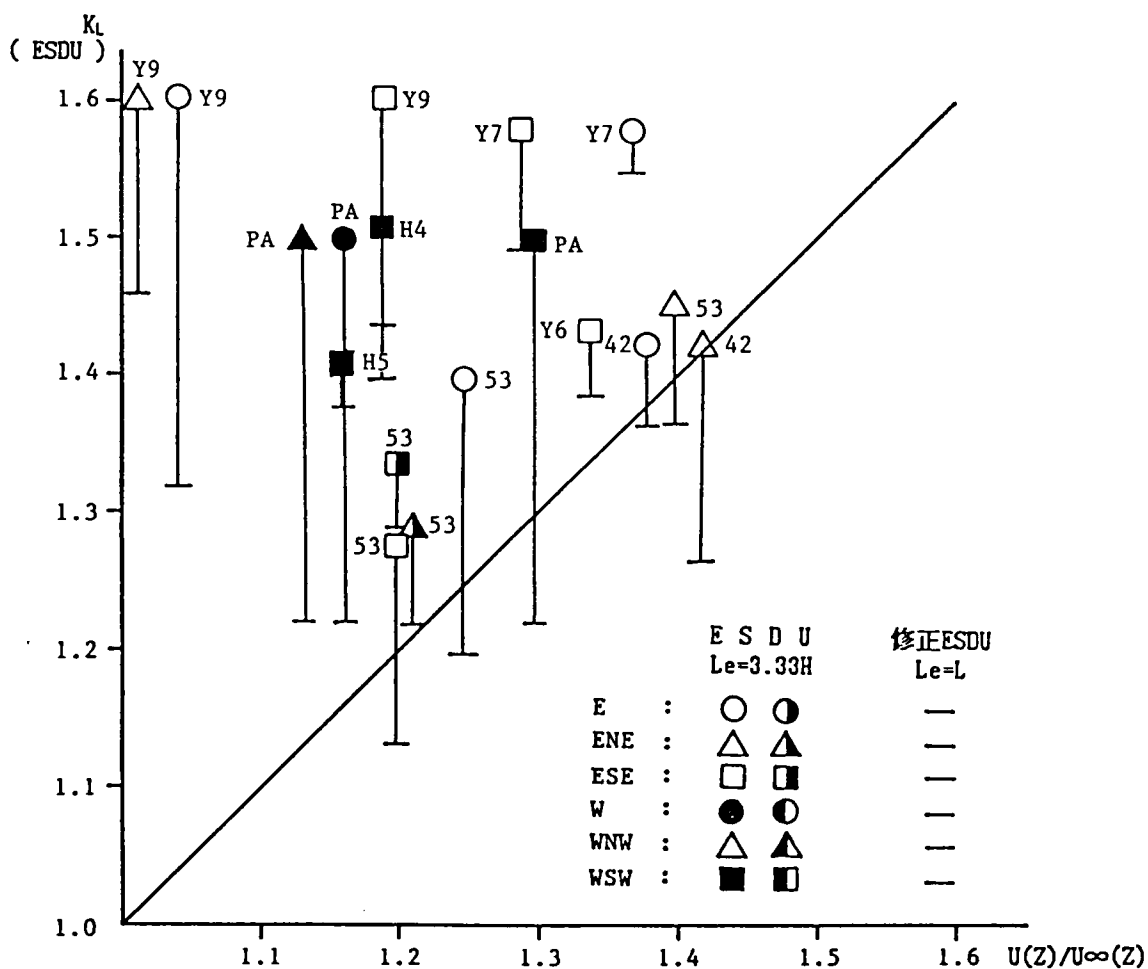


図6-18 急勾配の地形における増速率の測定値と修正ESDU推定値の相関

6-5 結言

本章においては、単純化地形模型、並びに、縮尺地形模型を用いて、従来あまり検討されていない比較的急峻な勾配の丘における増速効果について検討を加えた。本研究で得られた結果を以下に要約する。

- ①2次元丘状地形周辺の風況を支配する主たる地形因子は、従来より指摘されている法面勾配（増速効果）と丘の高さ（影響範囲）である。丘の上流側法肩部において剥離の生じる急峻な丘頂上部の地表面付近の増速率は、法面勾配に拘わらず一定となると考えられていたが、法面勾配の増加に伴って減少する。この現象は、丘前方に死水領域が生じるものの、丘頂部からの自由流線の剥離が、全ての法面勾配において一定ではなく、上流側法面勾配の増加に伴ってより上空に向かうことに起因していることが考えられる。
- ②縮尺地形模型を用いた実験より、剥離の生じない限界法面勾配以下の傾斜を有する比較的単純な地形形状の丘周辺部の増速効果は、提案されている推定式（ESDU）で精度よく推定可能であるが、複雑な形状の丘、並びに、急峻な丘に対する予測精度は低下することが明らかとなった。この原因としては、推定式に用いた地形特性の抽出が複雑な形状の丘では困難であることも挙げられるが、測点周辺部に急峻な勾配の斜面が存在することによる風速の過大評価にも起因すると判断できる。
- ③したがって、急峻な丘に対する増速効果のESDU予測式は、風速値を過大に評価することとなり、法面勾配を考慮した修正推定式を提案し、推定精度の向上が得られた。複雑な形状の丘に対しては、作用する気流の方向を正確に把握することが重要であり、今後検討すべき問題点も多く残されている。

第7章 谷及び切通し状地形における風況特性

7-1 概説

前章においては、最も単純且つ至る所に存在する丘状地形に対して、その局所地形の及ぼす増速効果について検討を加えたが、本章においては、大規模土木工事（切土）等によって風環境の変化を導く可能性のある切通しが存在する地形、及び、日本全国に存在するもののその地形形状と強風特性の関係が良く知られていない谷状地形に注目する。

人為的な構造物によって風環境が大幅に変化する代表例として、高層ビルが挙げられよう。そして、この高層ビルによる強風はビル風として多くの研究者によって調査され、その強風特性が解明されつつある。^{7-1)~7-3)} しかし、本章で着目しようとしている大規模な切土工事による風況変化の予測に関する研究例はほとんど行なわれていない。そして、我国のように周辺地形が複雑な形状を示す場合には、対象地域が変わると周辺部の地形特性が大きく変化し、したがって、風況特性が大幅に変化することが予想され、一般性に欠ける対処療法的な調査・研究となりがちである。

そこで、本章では、切通し部の拡幅による切通し後流部の増速効果、切通しが主流方向に比較的長く続く谷状地形における風況特性について、前章と同様に単純化地形模型を用いて検討し、支配的な地形因子を検出すると共にその増速効果を明らかにし、一般的な地形における増速予測の一助とするものである。そして、単純化模型を用いて得られた結果の妥当性は、現地強風観測及び縮尺地形模型を用いた風洞実験によって検討される。

また、模型化範囲が広くなり風洞の大きさの制約を受けると、縮尺が非常に小さくなることもあり、このようなとき鉛直縮尺と水平縮尺の異なるいわゆる‘ひずみ模型’が使用されることもあるが、このひずみ模型の適用性についても現地強風観測結果との比較によって若干の考察を加える。さらに、縮尺地形模型を用いた風洞実験によって対象領域の風況特性を推定するとき、模型化範囲を適切に決定する必要があるが、この問題については、明確な基準がなく研究者の経験に基づいて決定される場合が多い。市街地については風上側の模型化範囲を少なくとも周辺市街地の平均高さの10~25倍程度以上且つ測定点高さの20倍程度以上とすると、模型化された領域に内部境界層が発達し、接近流の影響が除去できると報告されている。⁷⁻⁴⁾ また、同報告によると、風上の大規模構造物の影響は、投影面積の平方根の10倍程度まで及ぶとされている。本研究においても上流側地物の効果・模型化範囲の決定方法等について若干の考察を加える。

7-2 単純化地形模型による谷及び切通し周辺部の風況特性

7-2-1 谷状地形における風況特性

実験に使用した単純模型の概略を、図7-1に示す。また、表7-1に実験に使用した値を示す。図並びに表より明らかなように、本研究においては、複雑な様相を示す谷状地形の簡略化として、台地状地形の中央部にV字形の直線状の水平且つ平行な谷を設定した。谷を代表する地形因子として、谷の長さ L 、幅 W 、及び、台地の上流・下流法面勾配 ψ を選定し、これらの因子の風況特性に及ぼす影響を調査するものであり、V字形谷の深さ H と谷の両側面の斜面勾配 θ はそれぞれ一定($H=5\text{cm}$ 、 $\theta=45^\circ$)とし、風向と谷の中心線も一致させている。

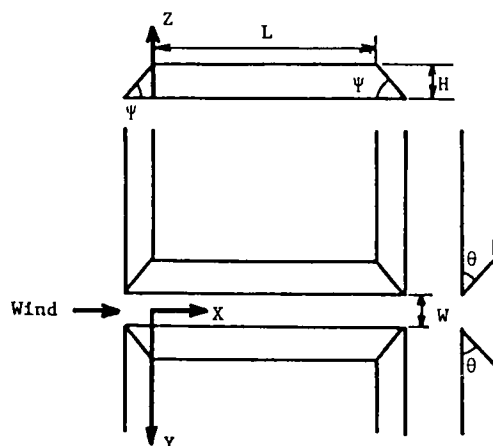


図7-1 単純化模型概略

表7-1 単純化谷状模型概略

谷の深さ H	5 cm
谷 幅 W	0, 2.5, 5, 10 cm
谷の長さ L	40, 100 cm
谷の斜面勾配 θ	45°
谷の上・下流法面勾配 ψ	18° , 40° , 60°

図7-2に、谷の底面の幅 W が谷の深さ H の $1/2$ 、谷の長さ L が $20H$ 、上流側斜面勾配 ψ が 40° における谷中心軸($Y/H=0$)上の風速分布(境界層外の風洞設定風速 U_0 で無次元化した値)を示す。また、図7-3～5に、台地状地形の上流側法面勾配を変化($\psi=18^\circ$ 、 40° 、 60° 、但し、 $L=20H$ 、 $W/H=0$)させた場合の谷横断面(対称となることより、中心軸を含む片面のみ表示している。)の風速分布を示した。さらに、図7-6～図7-8は、谷底幅 W を 0.5 、 1 、及び、 $2H$ とした場合の谷横断面の風速分布である。また、主流方向の乱れの強さ(I_u)の谷中心軸上の分布を図7-9に($\psi=40^\circ$ 、 $W/H=0$ (a図)、 $W/H=2$ 、(b図))、谷横断面方向の分布特性を図7-10に示した。なお、以上の図は、谷の長さ L が全て $20H$ における実験結果であるが、 $L=8H$ における実験結果($\psi=40^\circ$ 、 $W/H=0$)を図7-11に示す。

図7-11①に示した谷中心軸上の風速分布は、横軸(主流方向)の目盛りを谷の入口付近の風速をより詳細に表示するために、 $x/H=0$ を境界として変化させている(x/H が負の値

では、縦軸と同寸法であり、正の値では、図7-3と同寸法の縦軸の1/10のスケールを用いている。)

以上の各図の比較から、本研究に用いた直線・水平・平行な単純化谷状地形の定性的風況特性が明らかとなり、簡単にまとめると以下のようである。

- ①図7-2には、本研究で行なった実験の1ケースについて谷中心軸上の風速分布を示しにすぎないが、全ての実験結果において風速値は異なるが風速分布特性は類似しており、谷中心軸に沿う風速分布は次のようである。上流側斜面（谷の入口）の直前部分で風速は最小値となり、左右の山の高さが高くなるに連れて増速し、高さが一定となる部分 ($x/H=0$) において最も風速が大きくなり、その後、 x/H の増加と共に緩やかに減速し、 $x/H=6\sim 10$ 付近以後ほぼ定常な流れとなり、谷の出口付近において再び増速する。
- ②また、谷中心軸上における乱れの強さの分布特性も、平均風速の分布と類似し、増速地点の乱れの強さは減少し、減速領域において大きな乱れが生じている。
- ③谷横断面の風速分布より、最大風速の生じる位置は、谷の上流側側面の傾斜が緩やかな $\Psi=18^\circ$ のケースは、ほぼ谷の中心軸上に生じるが、谷の上流側側面の傾斜が険しくなると、谷の入口周辺部において、谷の稜線を越流して谷の内部に気流が流入し、谷の側面近傍付近に最大風速が生じる。また、谷中央部 ($x/H=10$) においても、最大風速は、谷の中心軸上ではなく谷の側面上に生じる。この風速分布特性は、第5章において調査した海峡部の風況特性と類似しているが、相模川における横断方向の風速分布は、河川中央部で最大風速が得られている⁷⁻⁵⁾。これは河川の線形形状に依存している（測定部の2km下流ではほぼ120度河川が湾曲、曲率半径 κ が大きい程増速効果が大きいと思われる。； κ の小さい半断面の測定結果）と考えられるが、線形形状に関する調査が必要である。また、谷幅の増加に伴って谷中心軸上の最大風速値は若干低下する。
- ④また、谷横断面の乱れの強さの分布から、 $x/H=0$ 付近の谷入口周辺部においては、谷の稜線からの剥離域に位置する領域で乱れの強さが増加し、稜線からの剥離は、谷の上流側勾配 ψ 及び谷幅 W/H の増加と共に強くなっている。本研究に使用したモデルは、谷側面の勾配が45度と比較的急斜面であり、谷幅の増加は、谷内部への気流の流入を容易にする働きがあるものと考えられるが、この点については、圧力測定等によって、さらに検討する必要がある。
- ⑤谷の長さが短くなる ($L/H=40$) と、 $x/H=0$ までは、長い谷における風速分布とほぼ同一であるが、 x/H の増加に伴って、若干風速値が上昇している。

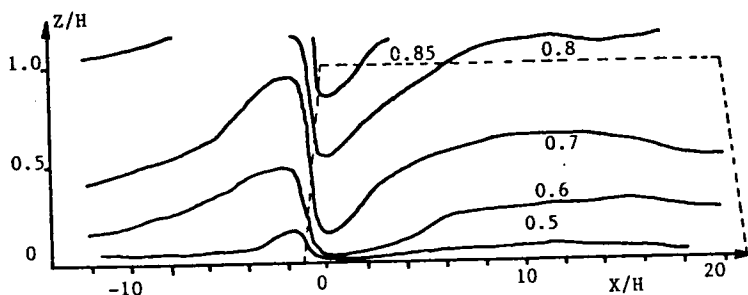


図 7-2 谷中心軸上の風速分布 U/U_0
($\psi = 40^\circ$, $\theta = 45^\circ$, $W/H=0.5$, $L/H=20$)

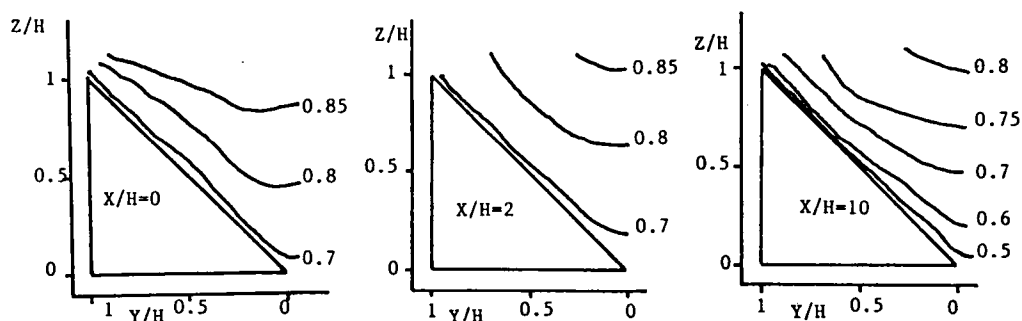


図 7-3 谷横断面風速分布 U/U_0
($\psi = 18^\circ$, $\theta = 45^\circ$, $W/H=0$, $L/H=20$)

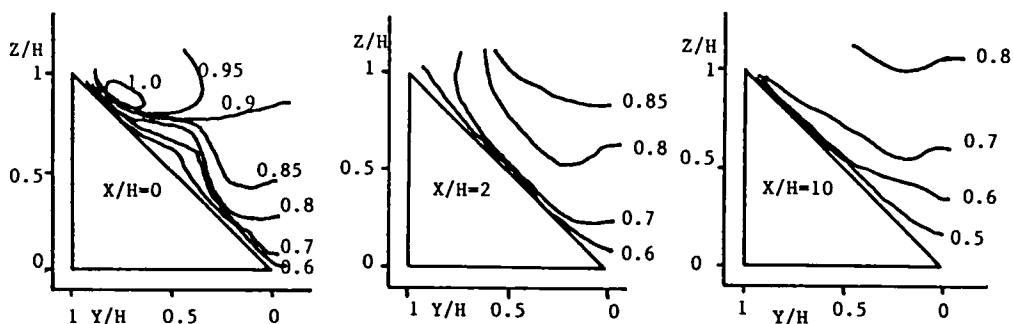


図 7-4 谷横断面風速分布 U/U_0
($\psi = 40^\circ$, $\theta = 45^\circ$, $W/H=0$, $L/H=20$)

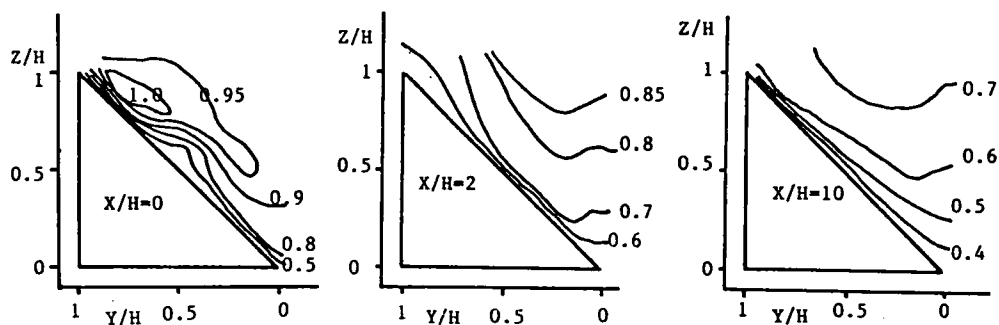


図 7-5 谷横断面風速分布 U/U_0
($\psi = 60^\circ$, $\theta = 45^\circ$, $W/H=0$, $L/H=20$)

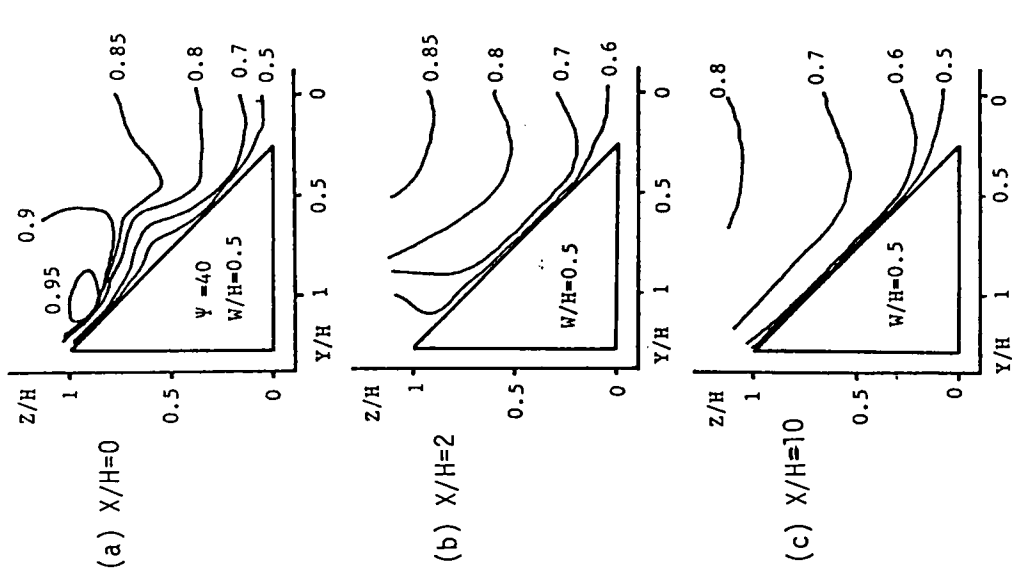


图 7-6 横断面风速分布
($W/H=0.5$, $\psi=40^\circ$, $\theta=45^\circ$)

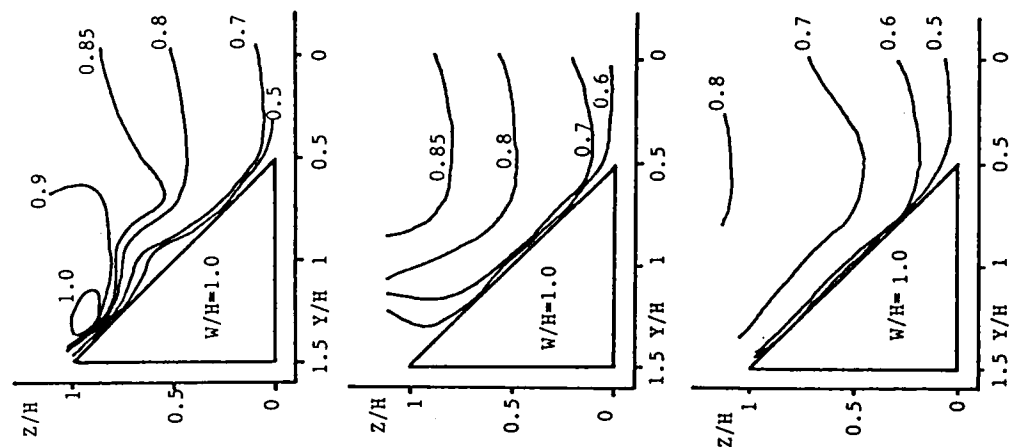


图 7-7 横断面风速分布
($W/H=1.0$, $\psi=40^\circ$, $\theta=45^\circ$)

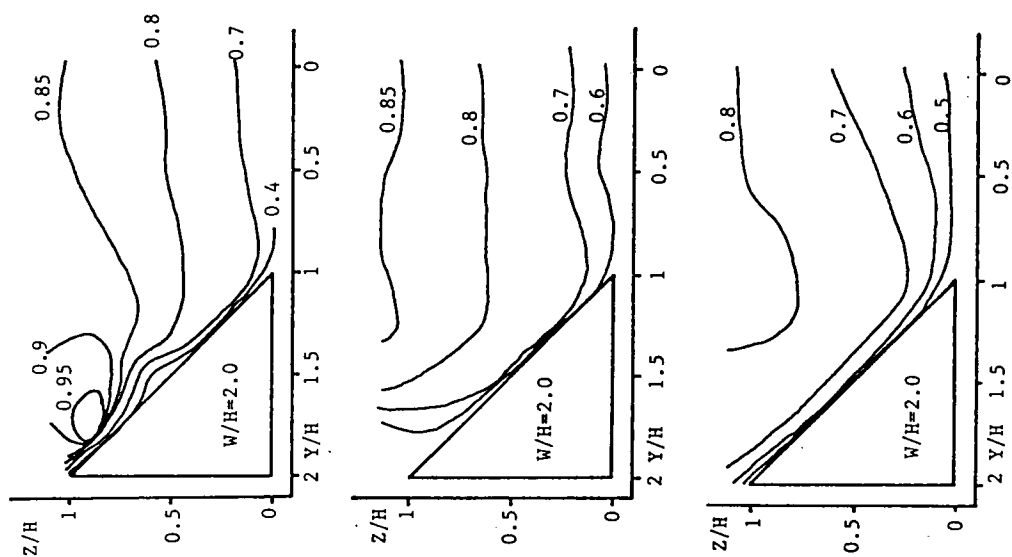


图 7-8 横断面风速分布
($W/H=2.0$, $\psi=40^\circ$, $\theta=45^\circ$)

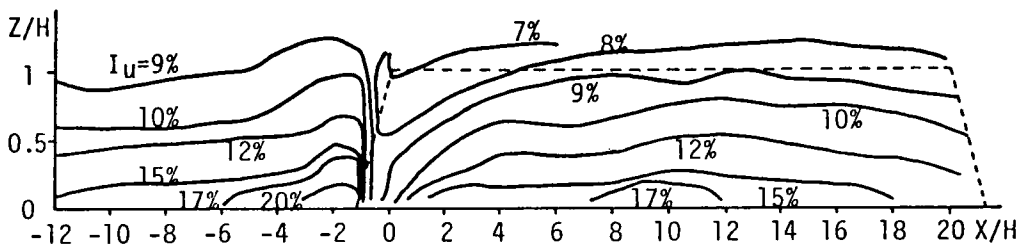


図 7-9 (a) 谷中心軸上の乱れの強さの分布 ($\psi=40^\circ$, $W/H=0$, $Y/H=0$)

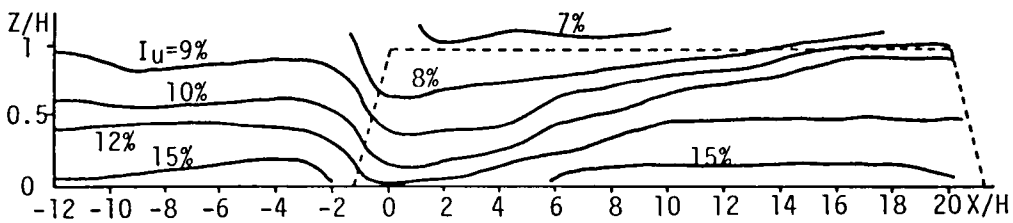


図 7-9 (b) 谷中心軸上の乱れの強さの分布 ($\psi=40^\circ$, $W/H=2$, $Y/H=0$)

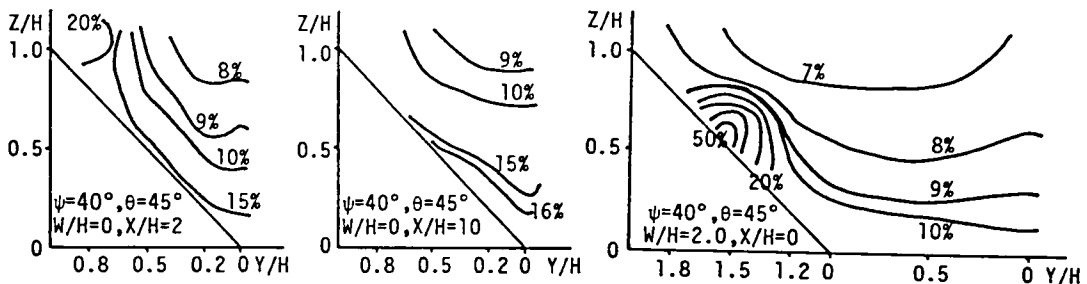
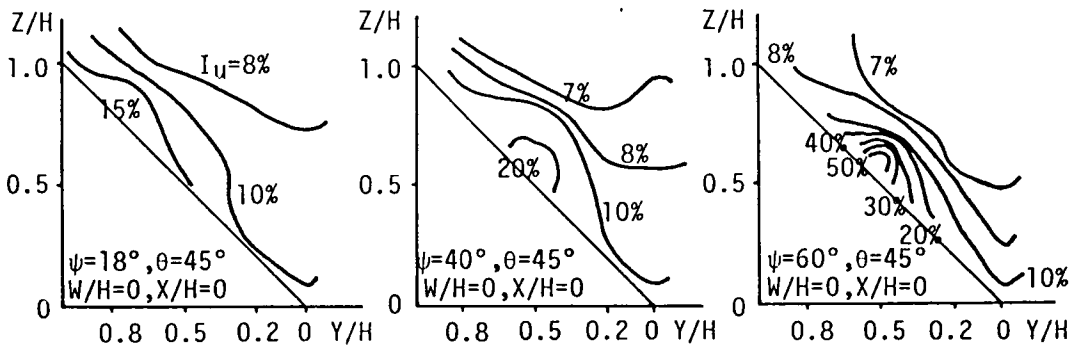


図 7-10 谷横断面上の乱れの強さの分布

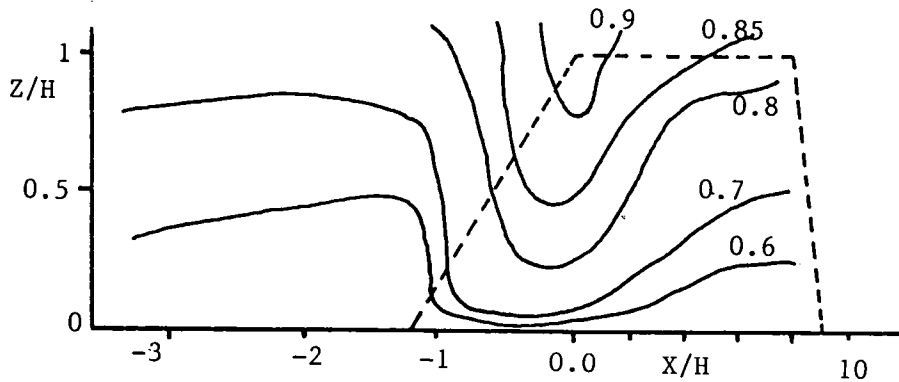


図 7-11 ㉔ 谷中心軸上風速分布 U/U_0
($\psi = 40^\circ$, $\theta = 45^\circ$, $W/H=0$, $L/H=8$)

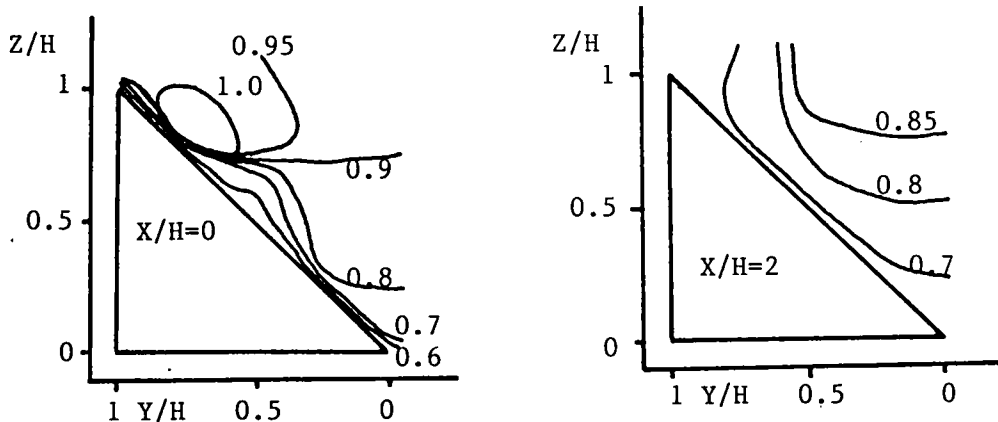


図 7-11 ㉕ 谷横断面上の風速分布 U/U_0
($\psi = 40^\circ$, $\theta = 45^\circ$, $W/H=0$, $L/H=8$)

次に、谷の上流側斜面の先端において、谷と直交する断面の風速分布の調査結果（測定された風速をそれぞれの高さの接近流速（模型を設置する前の境界層中の風速）を用いて無次元化して表示している。）を図 7-12 に示す。㉔図は上流側斜面勾配 ψ の変化についてまとめたものであり、㉕図は、谷の底面の幅 W をパラメータとして表示したものである。谷部から Y 方向に離れた地点においては、 ψ の急な谷及び W の狭い谷ほど丘状地形の遮蔽効果による風速低減が大きくなり、測定高さの低い測点における風速の低減率が大きくなっており、前章に示した 2 次元丘周りの流れに類似している。また、谷中心部に近づくとも減速効果が小さくなっており、谷状地形の上流側においては、上流側法面から谷に向かう流れが存在することが明らかである。

以上のことから、谷周辺の定性的な流れの特性が理解できるが、次に、各地形因子の谷周辺部の風速特性に及ぼす具体的影響についてまとめる。

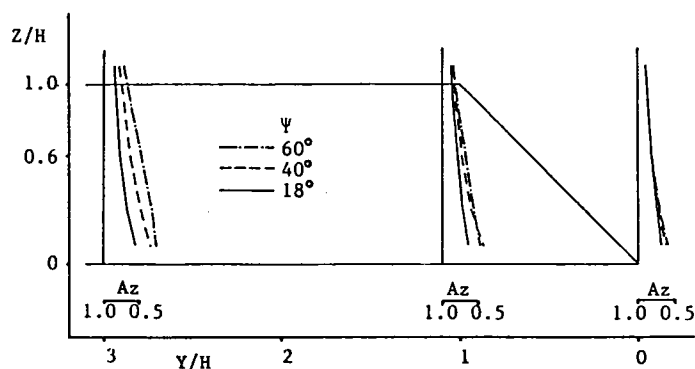


図 7-12 ㊸ 谷上流側風速分布 $Az=U(Z)/U_{\infty}(Z)$
($W/H=0$)

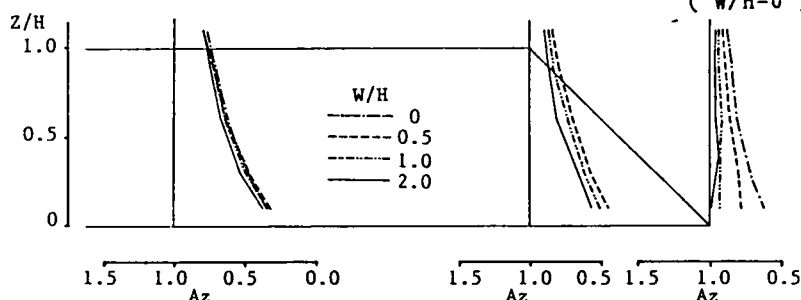


図 7-12 ㊹ 谷上流側風速分布 $Az=U(Z)/U_{\infty}(Z)$
($\psi=40^\circ$)

まず、図 7-13 には、 $\psi=60^\circ$ 、 $W/H=0$ のケースについて、谷の中心軸 ($Y/H=0$) 上における増速率（各測点で得られた風速を同一高さの接近流速（模型を設置する前の境界層中の風速値）を用いて基準化した値）を谷底からの高さ Z/H をパラメータとして示した。

谷底に近い測点ほど $x/H=0$ 付近における収束効果が大きくなり、増速率が非常に大きくなっているが、増速される領域は谷の底面において最も狭くなり、上層部ほど下流側に広がっている。また、谷の上流側並びに谷中央付近における風速の減少率は、谷底に近い測点ほど大きくなっている。なお、この特性は、上流側法面勾配 ψ (図 7-14㊸)、谷底面の幅 W/H (図 7-14㊹) 及び谷の長さ L/H (図 7-14㊺) に拘らず本実験結果全てに成立している。

次に、谷の中心軸上 ($Y/H=0$) における増速率に及ぼす上流側法面勾配 ψ の効果を図 7-15 に、また、谷の底面の幅 W/H の及ぼす効果を図 7-16 に、それぞれ、測定高さ毎にまとめて ($z/H=0.1, 0.6$ 、及び 1.1) 示す。なお、各図の横軸の原点は、図 7-1 に示したように、谷の深さ H が一定部分の最上流側の地点に定めており、それぞれの模型の谷の入口部は、図 7-15㊸ ($z/H=0.1$) において増速率が最小となっている地点 (図 7-16 では、

谷の入口は全て同一であり、㊸図中○印の最小点)である。

これらの図より、上流側法面勾配 ψ と谷の底面の幅 W/H の風況特性に及ぼす効果は、以下のように類似している。すなわち、 ψ の増加及び W/H の減少に伴って、 $x/H=0$ 付近において増速される領域が減少すると共にその領域における増速率が増大し、谷の上流並びに谷中央部における減速効果が大きくなり、上流側法面勾配 ψ の増加及び谷の底面の幅 W/H の減少は、前出の z/H が小さくなる場合(図7-13、14)と同一効果を与えており、この点についてさらに詳細に検討する必要がある。

また、谷の横断方向の増速率の分布について調査した結果を図7-17に示す。

まず、 $x/H=0$ 付近における谷の傾斜面上の測点(㊸、㊹図の $W/H=0$ 、 $\Psi=60^\circ$ 、 $\Psi=18^\circ$ の各模型では、 $Y/H=0.2$ 、 0.5 、及び 0.8 、㊺図に示す $W/H=2$ 、 $\Psi=40^\circ$ においては、 $Y/H=1.2$ 、 1.5 、及び 1.8)の増速率に注目すると、谷の稜線付近において気流が収束し、非常に増速されている。そして、その強い増速域の直背後に弱風域が存在していることから、谷の側面の傾斜角が 45° と比較的急であるために、稜線において剥離が生じていることも明らかである。また、前述のように、風速の最大値の生じる横断面上の測点の位置が、谷の中心軸($Y/H=0$)に必ずしも一致しないことも明らかである。なお、谷の側面上の測点における風速測定は、測定高さの設定に若干の誤差が生じる可能性もあり、ここでは、谷状地形の各地表面を基準とした相対高さが等しい場合には、谷の側面上における増速率が、谷中心部における値より大きいことを報告するに留める。

最後に、谷の側面斜面と谷底面が接する測点(谷幅 $W/H=0$ では $Y/H=0$ 、 $W/H=1$ 、 2 に対しては、 $Y/H=0.5$ 、 1)における増速率を図7-18に示す。

各測定高さにおいて、 W の増加に伴って、 $x/H=0$ 付近では、増速率が低下し、谷中央部では、減速率が小さくなり、谷底面の幅 W が谷の深さ H の2倍になると、ほぼ接近流と同一程度まで回復しており、谷幅の効果が大きいことが明らかである。

以上簡単に、水平・直線・平行な単純化谷状地形について、地形因子(谷の長さ、幅、上流側斜面勾配)の風況特性に及ぼす効果について実験的に検討を加え、各地形因子の風況特性に及ぼす効果が明らかとなったが、実際の谷は、鉛直勾配があり、谷幅・谷側面の斜面勾配も変化し、さらに、曲率も複雑に変化する非常に複雑な形状となり、単純化地形因子のみに注目しても、風況特性に及ぼす影響について解明すべき因子が多数残されている。

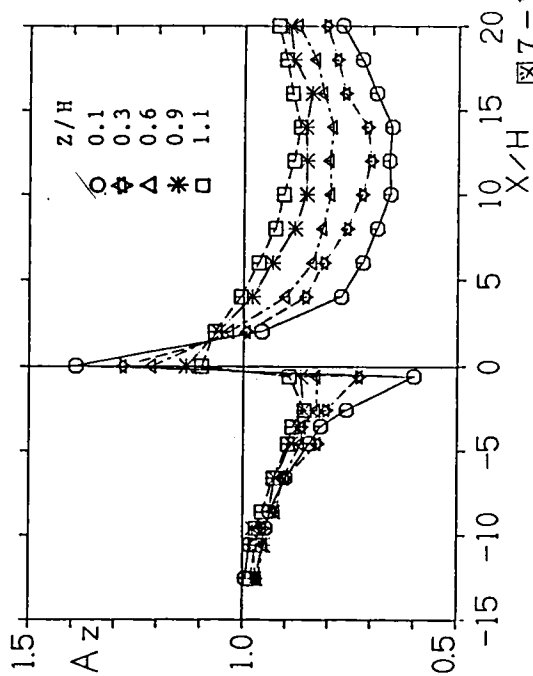
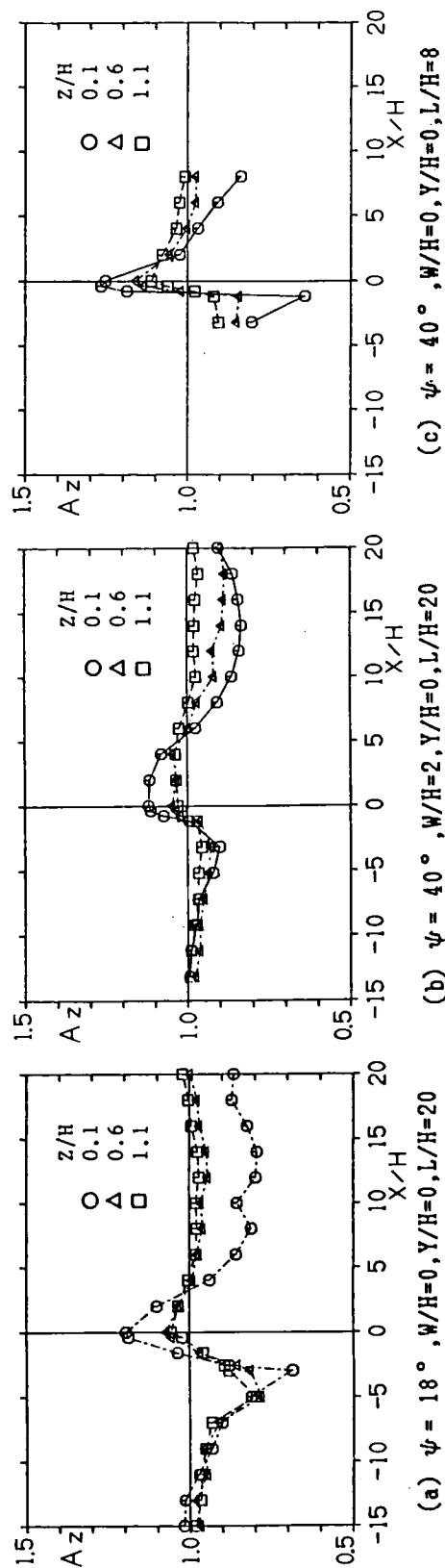


図 7-13 谷中心軸上の風速分布

($\psi = 80^\circ, W/H=0, Y/H=0, L/H=20$)



(a) $\psi = 18^\circ, W/H=0, Y/H=0, L/H=20$

(b) $\psi = 40^\circ, W/H=2, Y/H=0, L/H=20$

(c) $\psi = 40^\circ, W/H=0, Y/H=0, L/H=8$

図 7-14 谷中心軸上の風速分布

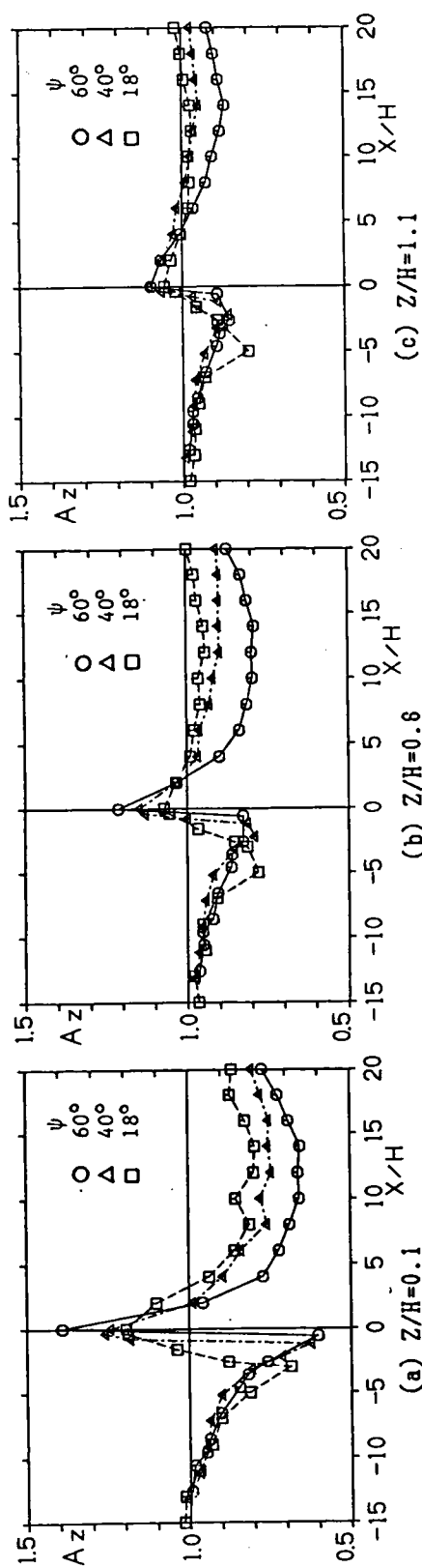


図 7-15 谷中心軸上の風速分布 ($W/H=0$, $Y/H=0$, $L/H=20$)

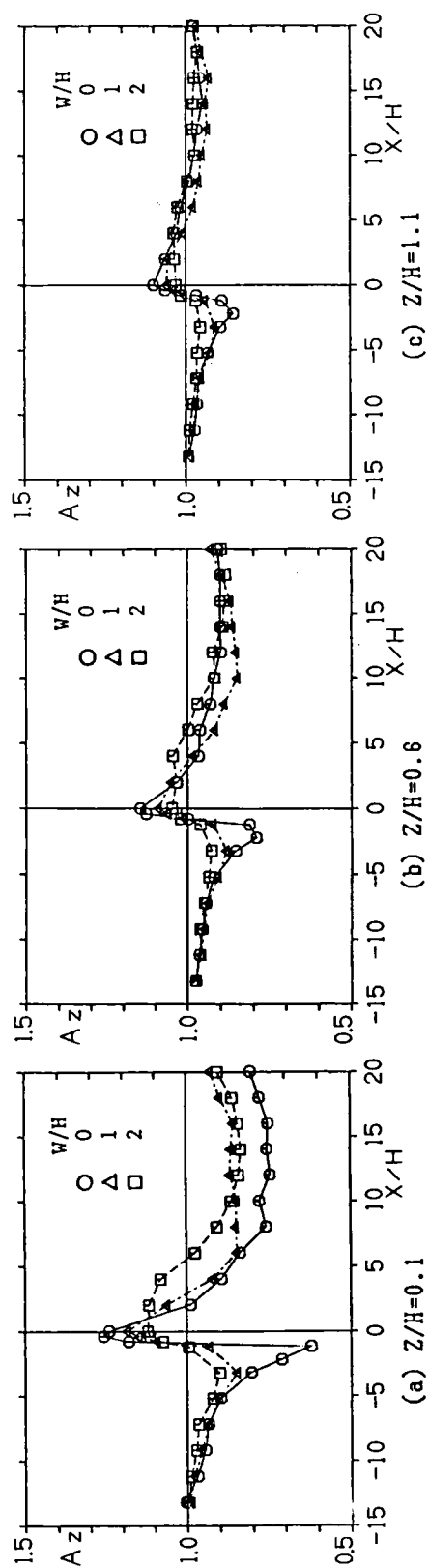


図 7-16 谷中心軸上の風速分布 ($\psi = 40^\circ$, $Y/H=0$, $L/H=20$)

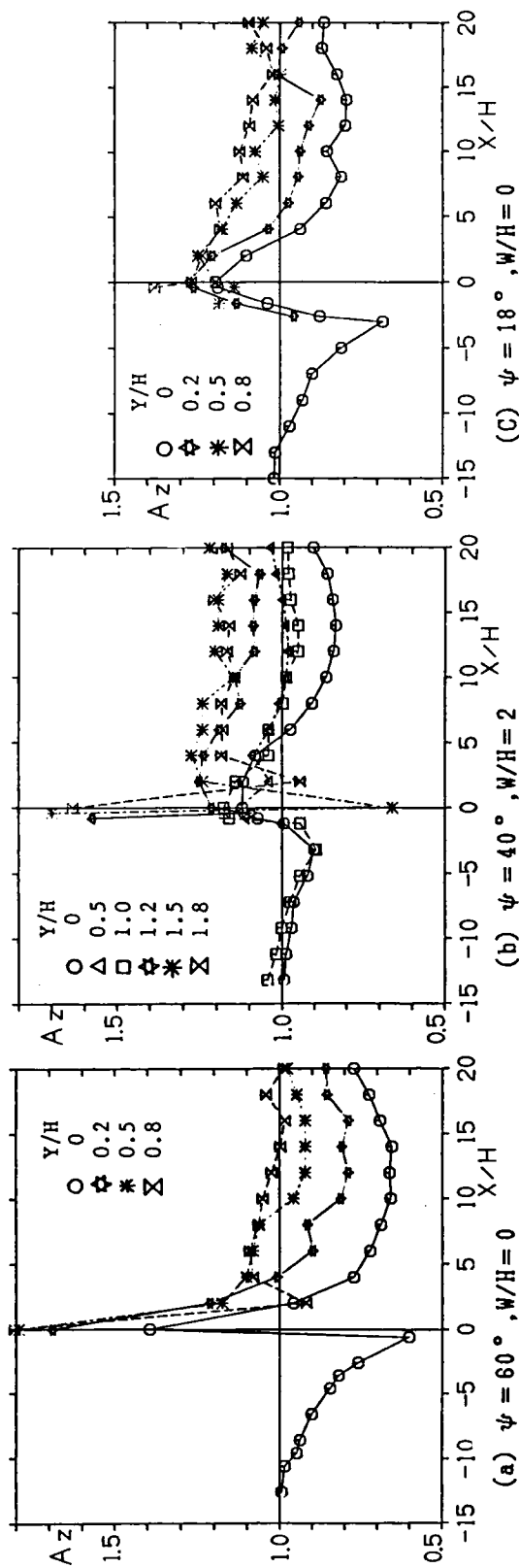


図7-17 谷横断面の風速分布 ($Z/H=0.1, L/H=20$)

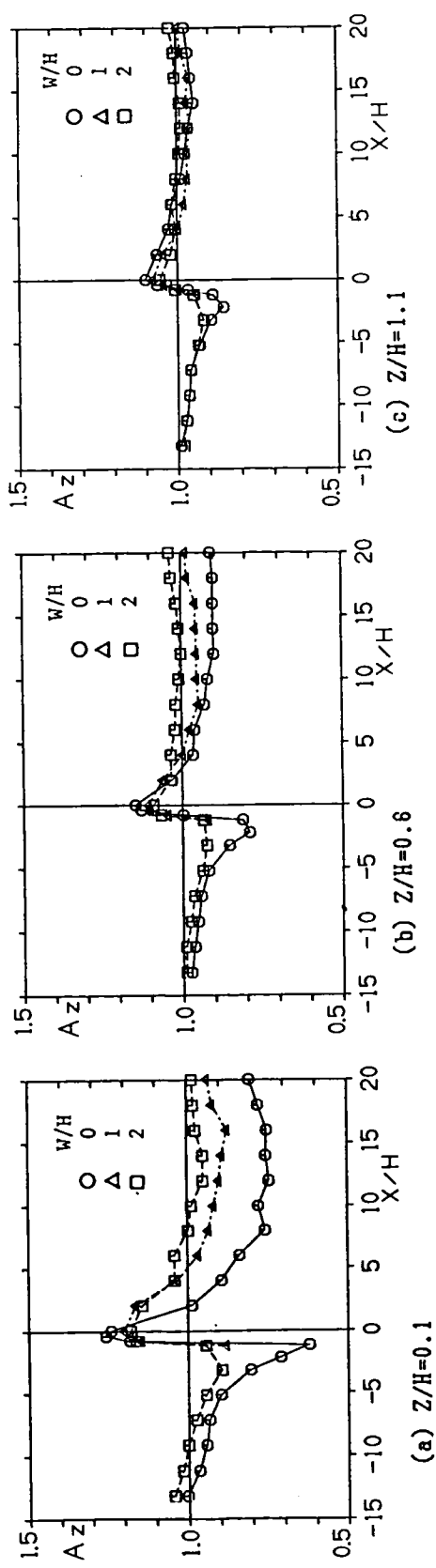


図7-18 谷の斜面と底面の交点における風速分布 ($\psi = 40^\circ, L/H = 20$)

7-2-2 切通し周辺部における風況特性

尾根状地形における尾根の切れ目周辺部には気流が収束し、その下流側に強風が作用することがよく知られており、特に、大気不安定度を考慮した大規模な地形条件下においては、局地風として有名なダシ風もこの範ちゅうに属するものであるが⁷⁻⁶⁾、ここでは、大気不安定度等がほとんど問題とならないような局所的切通し状地形を対象として、地形特性と増速効果について検討を加える。

実験に使用した単純模型は、図7-19に示すように気流に直角に設置された2次元の台形断面を有する丘の中心部に開口部を設置したものであり、各模型の地形因子は、尾根の高さ H 、尾根の法面勾配 ψ 、開口部勾配 θ 、開口幅 W とし、表7-2に実験に使用した値を示した。また、実験に使用した境界層の特性は2-3節に示したように、ベキ指数 α は約0.15であり、比較的地表粗度が小さい地域における切通しを対象としている。なお実験風速は、5m/sと2.5m/sで実施したが、特に大きな差が見られなかったので、ここでは5m/sの結果を用いて検討する。

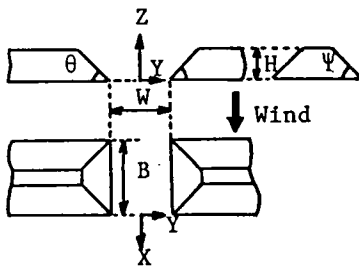


表7-2 単純化模型概略

Height of model:	$H(\text{cm})=3, 5.0, 7.5, 10.0$
Angle of slope:	$\psi(\text{deg})=20, 30, 40, 45, 55$
Width of model:	$B(\text{cm})=9.5, 11, 14, 15, 20$
Width of opencut:	$W(\text{cm})=0.0, 5.0, 10.0, 20.0, 30.0$
Angle of opencut-slope:	$\theta(\text{deg})=27, 35, 40, 45, 50, 55, 60$
Angle of attack:	$\beta(\text{deg})=-45, -22.5, 0, 22.5, 45, 67.5$

図7-19 単純化模型概略

まず、切通し周辺部の風況特性の概略を示す。

写真7-1は、切通し開口幅 W が5cmと10cmにおける地表面付近（約 $z/H=0.15$ ）の風向分布を示したものであり、㊸は、模型高さ H が5cm、上流側法面勾配 ψ と切通し開口部勾配 θ が、共に 34° であり、㊹は、 $H=7.5\text{cm}$ 、 $\psi=\theta=45^\circ$ 、そして、㊺が、 $H=10\text{cm}$ 、 $\psi=\theta=53^\circ$ である。また、図7-20は、これらの模型周辺部の切通し開口幅 W が5cmにおける風速分布を水平面（ xy 平面、 $z/H=0.2, 1.2$ ）、尾根筋と平行な面（ yz 平面、 $x/b=3$ 、 b は尾根の底面長 B の $1/2$ ）及び、切通し中心軸上（ xz 平面、 $y/H=0$ ）について示したものであり、尾根の開口幅 $W=10\text{cm}$ の風速分布は、 $H=7.5\text{cm}$ の実験結果を併せて示し、各図中の数字は、切通し上流側の基準点の風速値で無次元化したものである。また、図7

図7-21には、各模型における主流方向の乱れの強さ I_u の水平面の分布を示した。なお、模型高さ H の影響を取り除くために、各模型に対する境界層の高さ δ は $\delta = 5H$ に統一し、それぞれのべき指数 α もほぼ一致させている。

これらの図から、切通し周辺部の風況特性は、尾根によって遮蔽された流れが尾根の切通し部分に収束し、切通し部及びその下流において増速し、切通し通過後に尾根の背後の負圧領域に気流が巻込んでいることがよく理解でき、このような流れに及ぼす、地形因子の効果について簡単にまとめると以下のようなものである。

- ①風向分布より明らかなように、尾根の上流側では、上流側法面勾配 ψ の増加に伴って切通し部に気流が収束する傾向が見られ、切通し部及びその下流中心軸上における増速効果が大きくなり、乱れの強さも減少している。
- ②切通し部の勾配 θ が、緩やかになると切通しの直背後ではなく、下流側斜面のごく下流における増速効果が大きくなり、また、尾根から離れた下流域においても θ が小さいほど切通しを通過した気流が左右に拡散している。また、この現象は、乱れの強さの分布からも明らかである。
- ③切通しの幅 W が広くなると、切通し中心部並びに切通しの近傍における増速効果は小さくなるが、増速効果は下流側に拡がっており、前項に示した谷状地形の谷幅 W の効果と同一である。また、切通しからの左右への拡がりは、切通し中心でなく尾根の切れ目を基準として比較するとほとんど差はない。

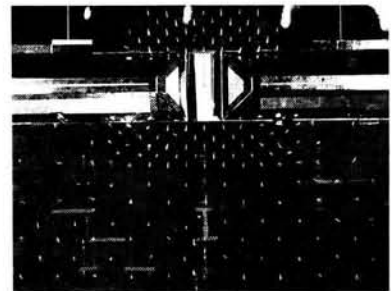
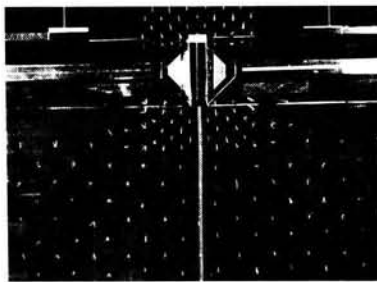
これらのことから、対象範囲が広く模型縮尺が小さくなるとき、しばしば利用される鉛直縮尺と水平縮尺が異なるいわゆる“ひずみ模型”を使用した地形模型実験は、地形の改変等による定性的或は相対的な評価は可能であるが、地形特性の及ぼす効果が過大に評価され、定量的評価には不適當であることが明らかである。

また、実験風速・模型縮尺をそれぞれ $1/2$ として、 Re 数の及ぼす影響を調査した実験結果の一例（ $H=7.5\text{cm}$ 、 $W=5\text{cm}$ 、 $\psi=\theta=45^\circ$ 、水平面内（ xy 平面、 $z/H=0.2, 1.2$ ）風速分布）を、図7-22に示したが、風速・模型寸法による影響はほとんど無いことが確認できる。

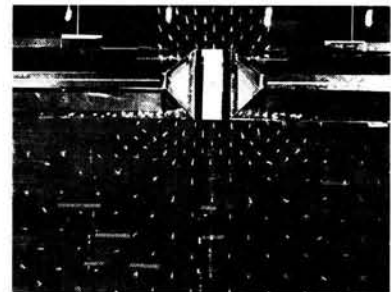
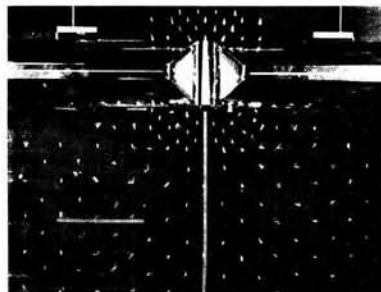
Open Cut:5cm

Open Cut:10cm

(a) $H = 5\text{cm}$
 $\psi = \theta = 34^\circ$



(b) $H = 7.5\text{cm}$
 $\psi = \theta = 45^\circ$



(c) $H = 10\text{cm}$
 $\psi = \theta = 53^\circ$

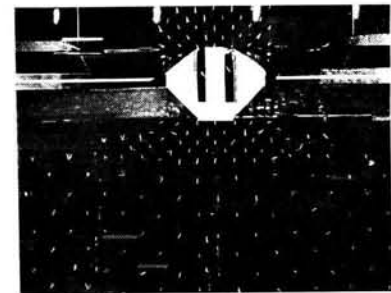
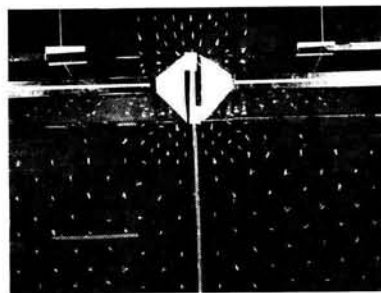


写真7-1 切通し状地形周辺の風向分布

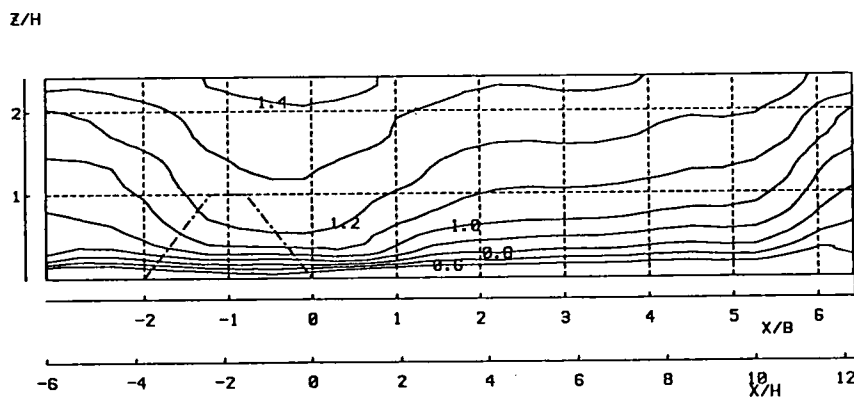
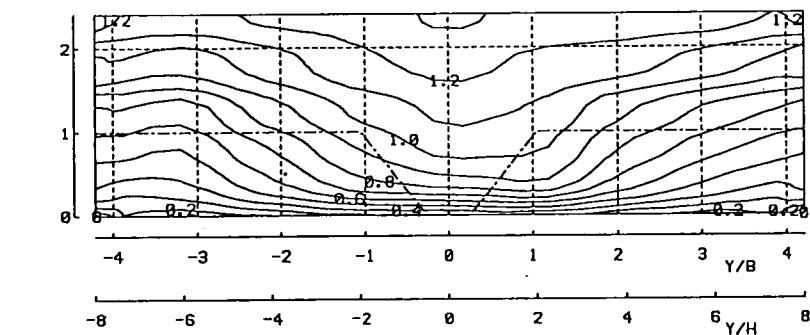
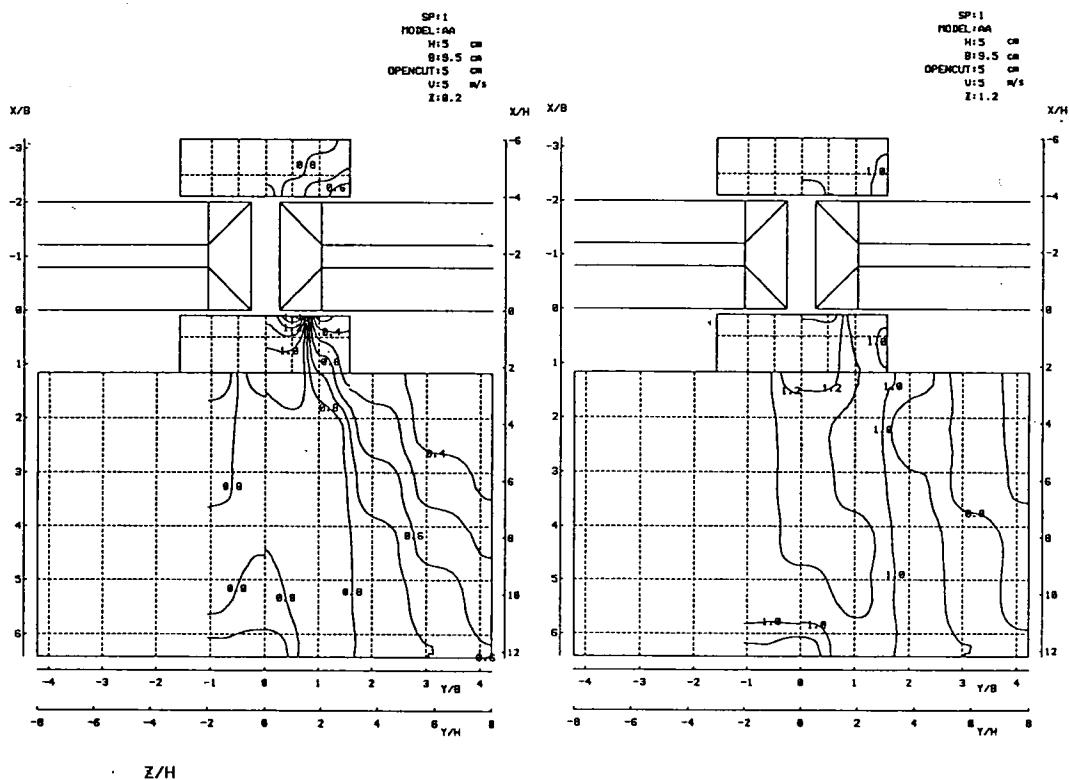
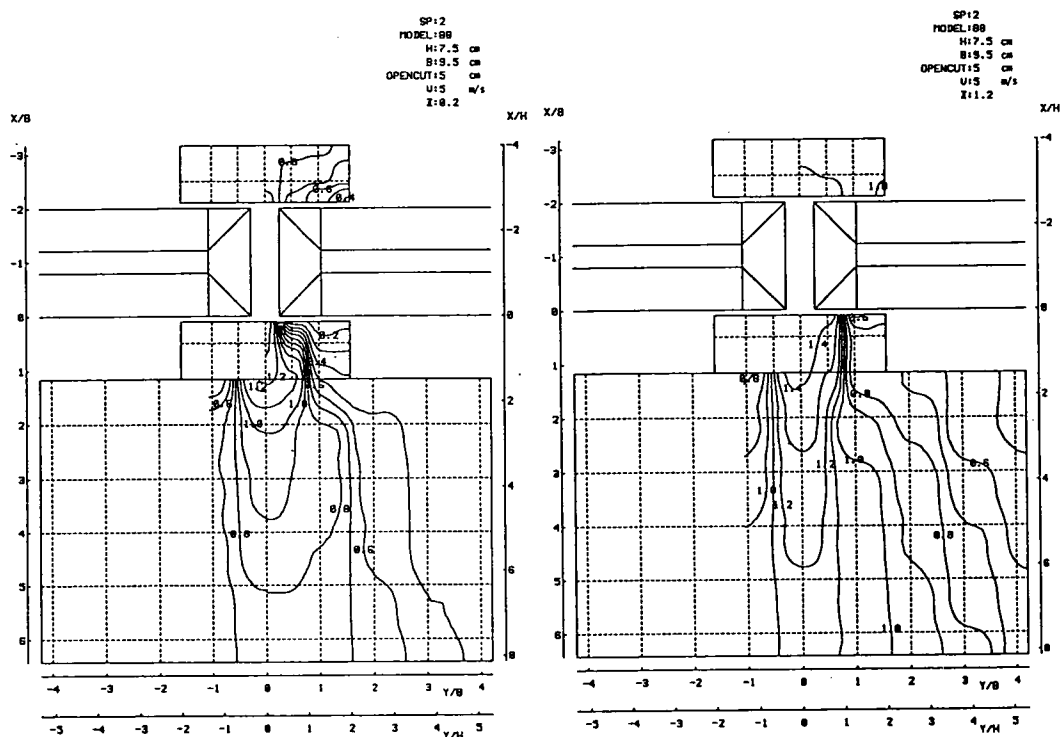
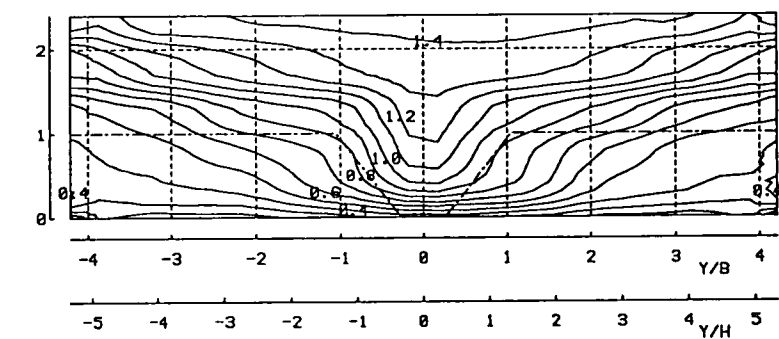


図7-20 ① 切通し周辺の風速分布

($H=5\text{cm}$, $\psi = \theta = 34^\circ$, $W/H=1$, $U_0=5\text{m/s}$)



Z/H



Z/H

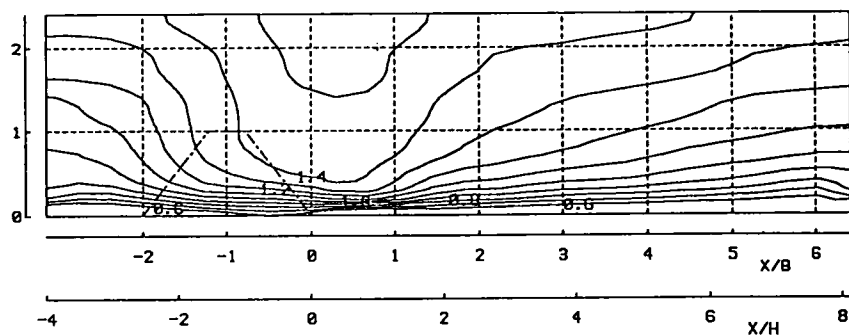
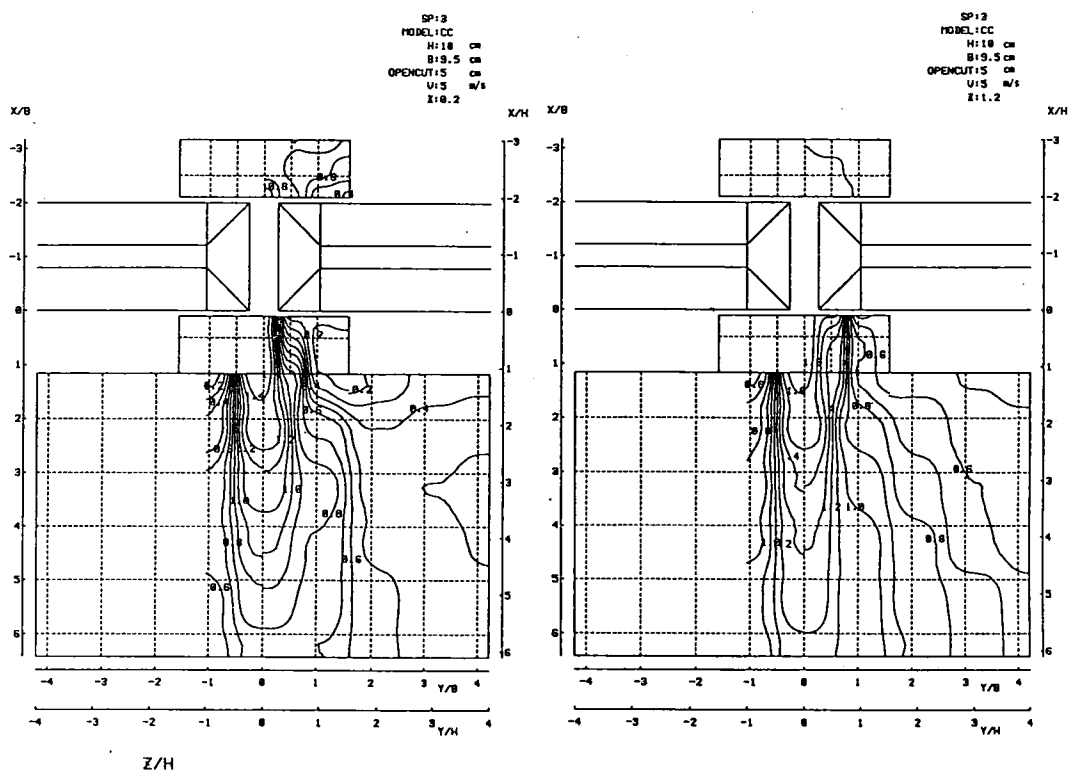
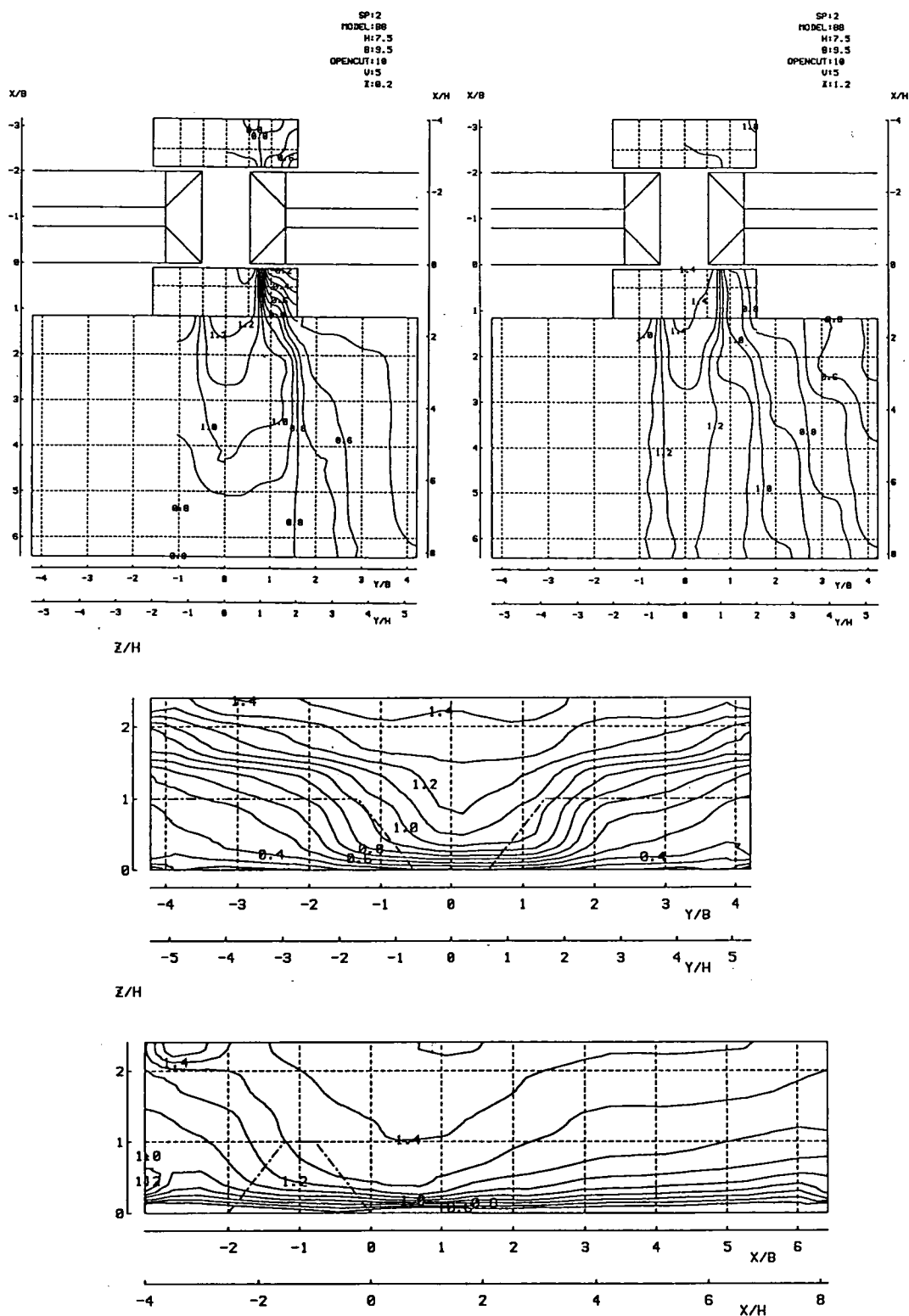


図7-20 ⑥ 切通し周辺の風速分布
($H=7.5\text{cm}$, $\psi = \theta = 45^\circ$, $W/H=2/3$, $U_0=5\text{m/s}$)





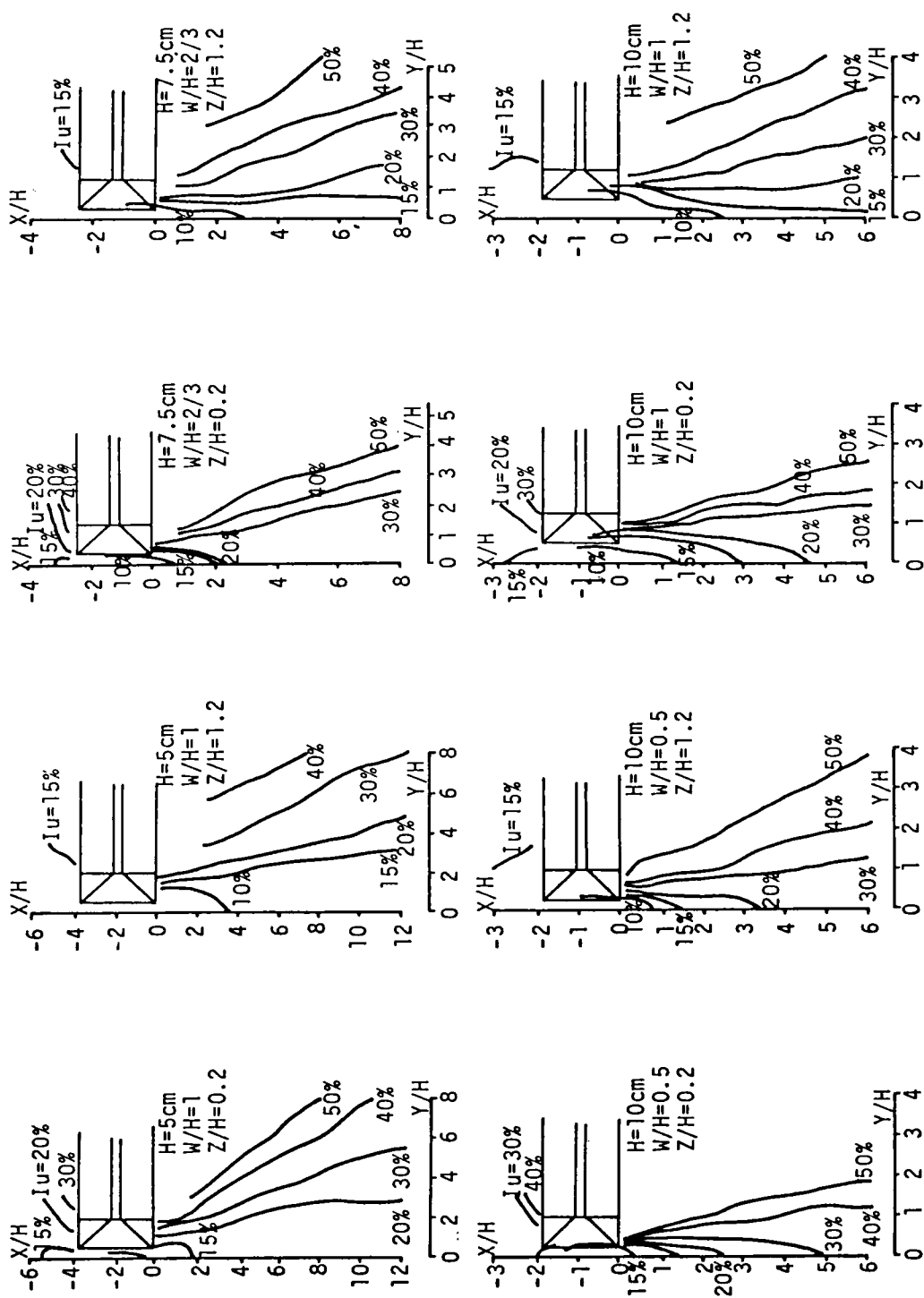


図 7-21 切通し周辺部の乱れの強さの分布

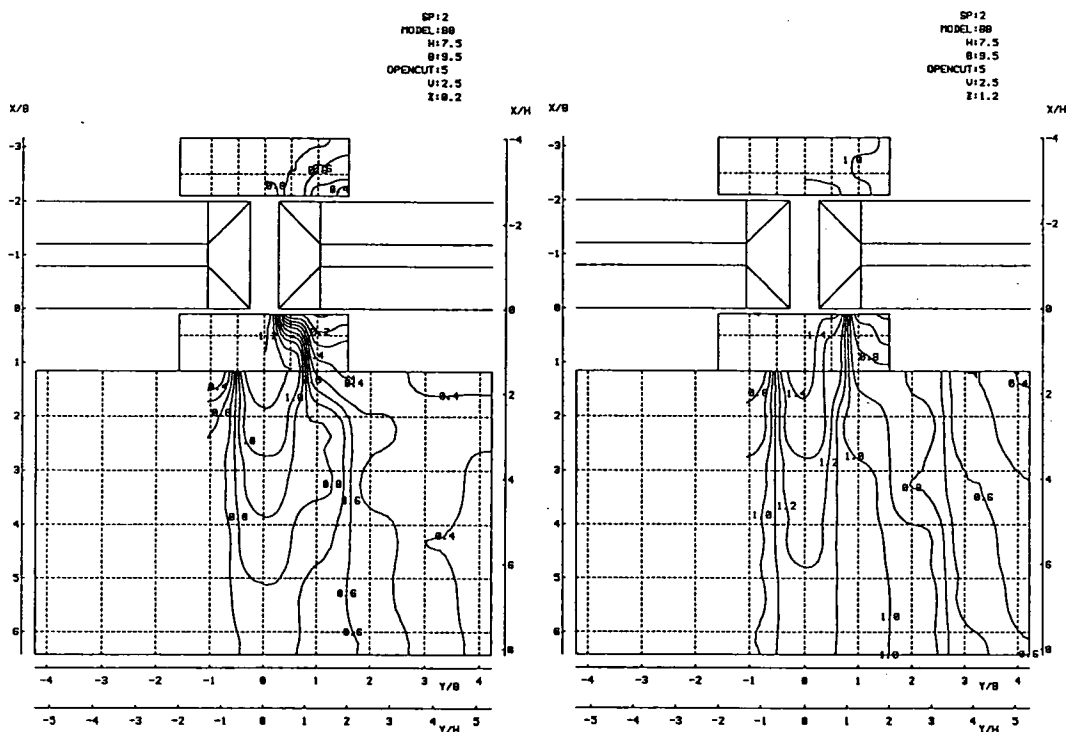


図 7-22 ㉓ 切通し周辺の風速分布
($H=7.5\text{cm}$, $\psi = \theta = 45^\circ$, $W/H=2/3$, $U_0=2.5\text{m/s}$)

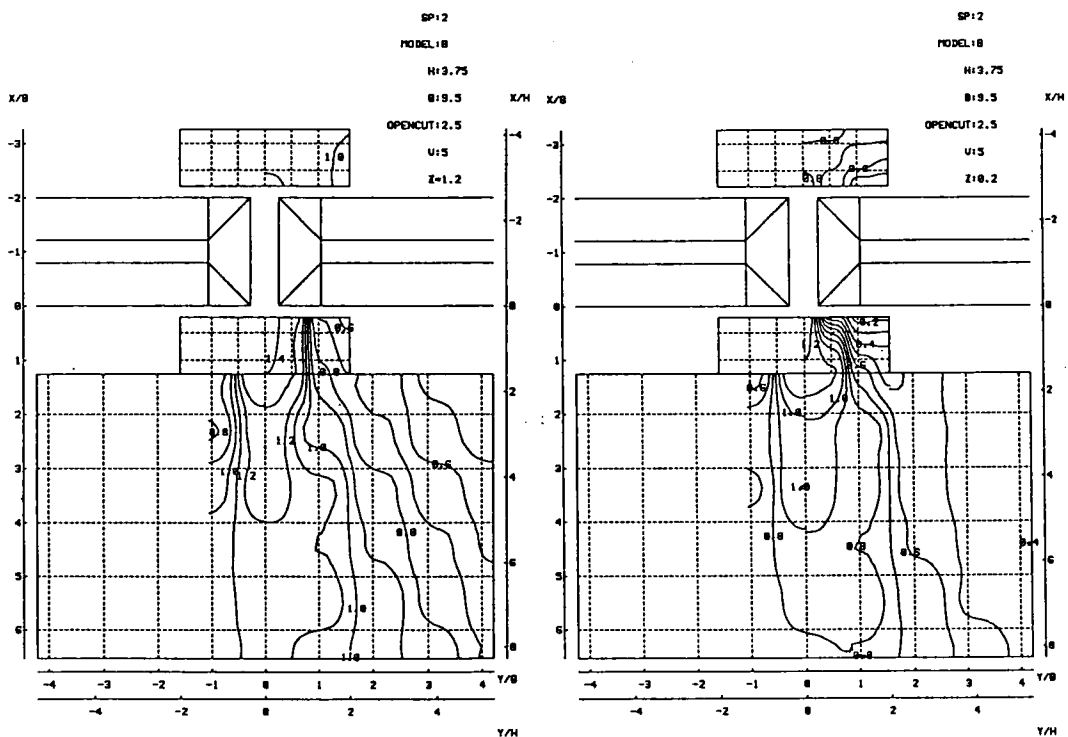


図 7-22 ㉔ 切通し周辺の風速分布
($H=3.75\text{cm}$, $\psi = \theta = 45^\circ$, $W/H=2/3$, $U_0=5\text{m/s}$)

次に、切通し周辺部における増速率 A_z （前項に示したように、測定された風速を、同一高さの接近流速で基準化したもの）に各地形パラメータの及ぼす効果を検討する。

まず、図7-23④、⑤は、それぞれ、開口部勾配 θ 、及び、上・下流側法面勾配 ψ をパラメータとして切通し開口幅 W を変化させたときの測定高さ $z/H=0.5$ における切通し中心軸上 ($y/H=0$) の増速率を示したものである。また、図7-24④、⑤は、同様に、 θ と ψ をパラメータとして測定高さの及ぼす影響を示したものである ($W/H=4$)。前述のように、 W の増加は、切通し中心部の風速を低下を導き、増速域を下流側に拡大する働きがある。また、測定高度の低い測点における増速効果が大きくなっており、増速率は、谷状地形における値より大きいものの、前項の谷状地形の風況特性と類似している。

また、開口部勾配 θ と上・下流側法面勾配 ψ の風況特性に及ぼす効果には、明らかな差が認められる。すなわち、ここに示した切通し中心軸上の特性に限定すれば、 θ の影響が表われているのは、 $W/H=0$ のケースのみであるのに対し、 ψ は、 $W/H=4$ とかなり切通し幅が広がっても、 ψ の増加に伴なって風速値が上昇しており、このような切通し周辺部の風況を支配する重要な地形因子であることが明らかである。

さらに、この両地形因子の尾根背後の風況に及ぼす影響を $W/H=2$ の開口幅の模型について調査した結果を図7-25に示す。各図は、それぞれ、 $y/H=0$ （切通し中心部）、 $y/H=2$ （一様な高さの尾根と開口部斜面の境界部周辺）、及び、 $y/H=4$ （尾根の背後）の風速を示したものであり、 θ の影響は開口部斜面の下流部周辺に限定され、 θ の増加に伴って増速率が小さくなる。一方、 ψ は、切通し中心部のみならず尾根背後の後流域の流速分布も支配していることが明らかである。

以上のことから、2次元丘に開口部を設けた地形周辺の風況を支配する地形因子として切通しの開口幅 W 、丘の法面勾配 ψ 、及び、影響範囲等の基準となる丘の高さ H が挙げられる。特に、 ψ の及ぼす影響が大きいことが判明したが、これは、尾根上流側の天端から剥離する流れが周辺部の流況を支配していると考えられ、この剥離現象が ψ によって影響を大きく受けることに起因していると考えられる。

さらに、上流側法面勾配と下流側法面勾配を本研究においては、同一とした対象形の断面を使用しているが、下流側法面勾配の影響も無視できないと考えられ、この点についても、検討する必要がある。また、ここでは、切通しに直交する風向についてのみ検討を加えたが、尾根に気流が水平偏角を有して作用するときの風況特性についても考慮する必要があり、この点については、次章において簡単に考察を加える。

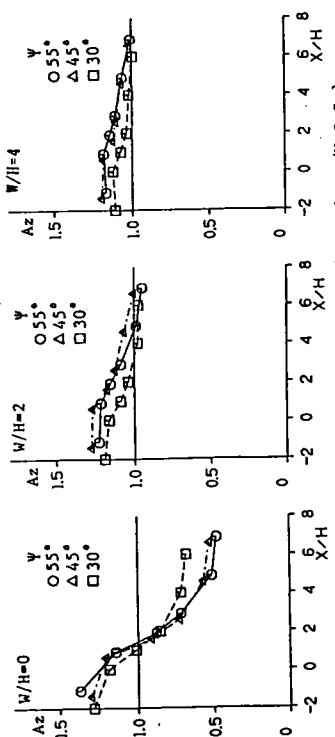


図 7-23 ①切通し中心軸上の風速分布 ($\theta = 60^\circ$, $Z/H = 0.5$)

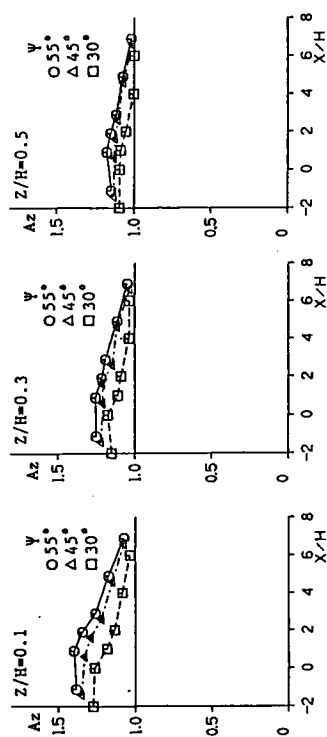


図 7-24 ①切通し中心軸上の風速分布 ($\theta = 60^\circ$, $W/H = 4$)

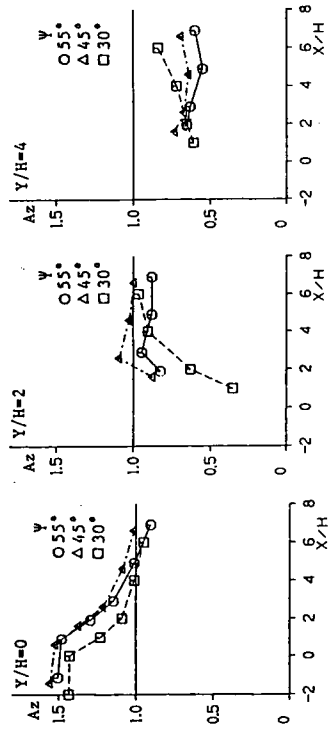


図 7-25 ①切通し周辺部の風速分布 ($\psi = 60^\circ$, $W/H = 2$, $Z/H = 1$)

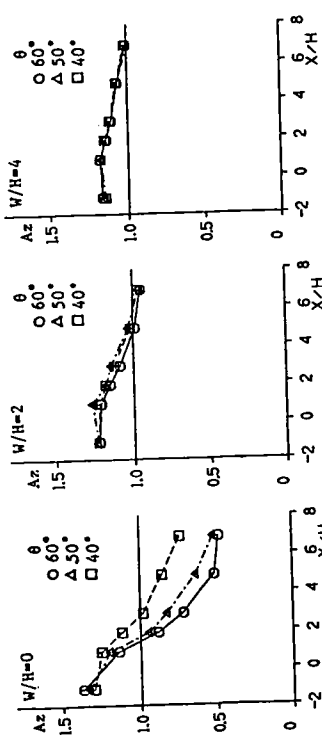


図 7-23 ②切通し中心軸上の風速分布 ($\psi = 55^\circ$, $Z/H = 0.5$)

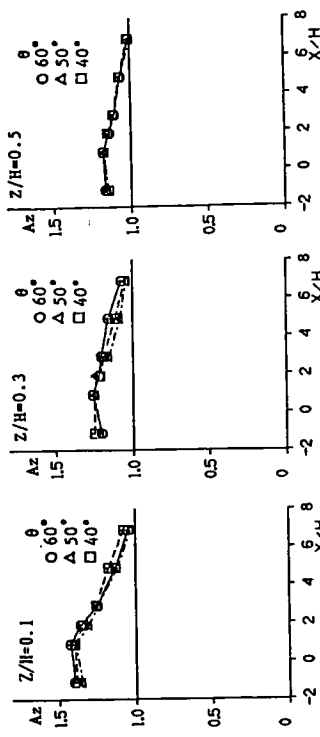


図 7-24 ②切通し中心軸上の風速分布 ($\psi = 55^\circ$, $W/H = 4$)

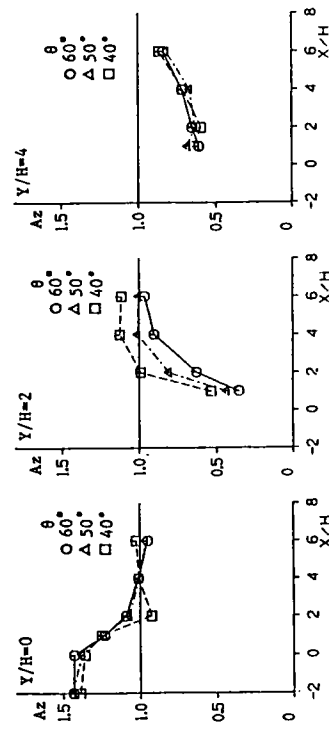


図 7-25 ②切通し周辺部の風速分布 ($\psi = 30^\circ$, $W/H = 2$, $Z/H = 0.1$)

7-3 複雑な谷及び切通し状地形における風況特性

7-3-1 山間部の谷状地形における切通し周辺部の風況特性

図7-26に示す山間部の道路改修拡幅工事に伴ないトンネル部分をオープンカットする必要が生じ（図7-27）、トンネル西出口付近の民家は、東寄りの風に対してこれまで防風壁の作用をしていた尾根筋が取り払われることとなり、風環境が大幅に変化することが懸念され、工事前後の風況特性に関して、このような山間部の複雑な地形条件における理論的風況予測手法は未だ確立されていないことから、縮尺地形模型を用いた風洞実験によって調査されている⁷⁻⁷⁾。ここでは、この風洞実験結果を7-2-1に示した単純化谷状地形模型結果の複雑な地形への適用性に注目して考察を加えるものである。なお、トンネル周辺部の風況特性に注目することより、模型化範囲は、図中の円で囲まれた領域であり、地表面付近の細部の再現性を考慮して模型縮尺が1/500に定められている。なお地形が複雑であり、模型化範囲としては必ずしも十分ではないが、風上側の地形の影響を可能な限り取り込むために、写真7-2に示すような補助地形模型を製作して風向に応じて適宜設置している。

調査対象風向は、トンネルの南側の調査対象谷筋にほぼ平行な北東-南西方向とし、さらに、北東方向から東寄りに15度（トンネル北側の谷筋の走行方向）及び30度偏った2風向を追加している。

風洞気流としては、山岳部における境界層流れを想定して、2-3節に示したようなベキ指数 α が約0.3の境界層乱流をスパイアとラフネスブロックを用いて発生させ、5m/s及び3m/sの実験風速（根本の1/3乗則を用いるとそれぞれ実風速約40m/s及び、24m/sに相当する。）にて調査している。

風速計測点は、図7-28に示すように主として道路上に設定している。

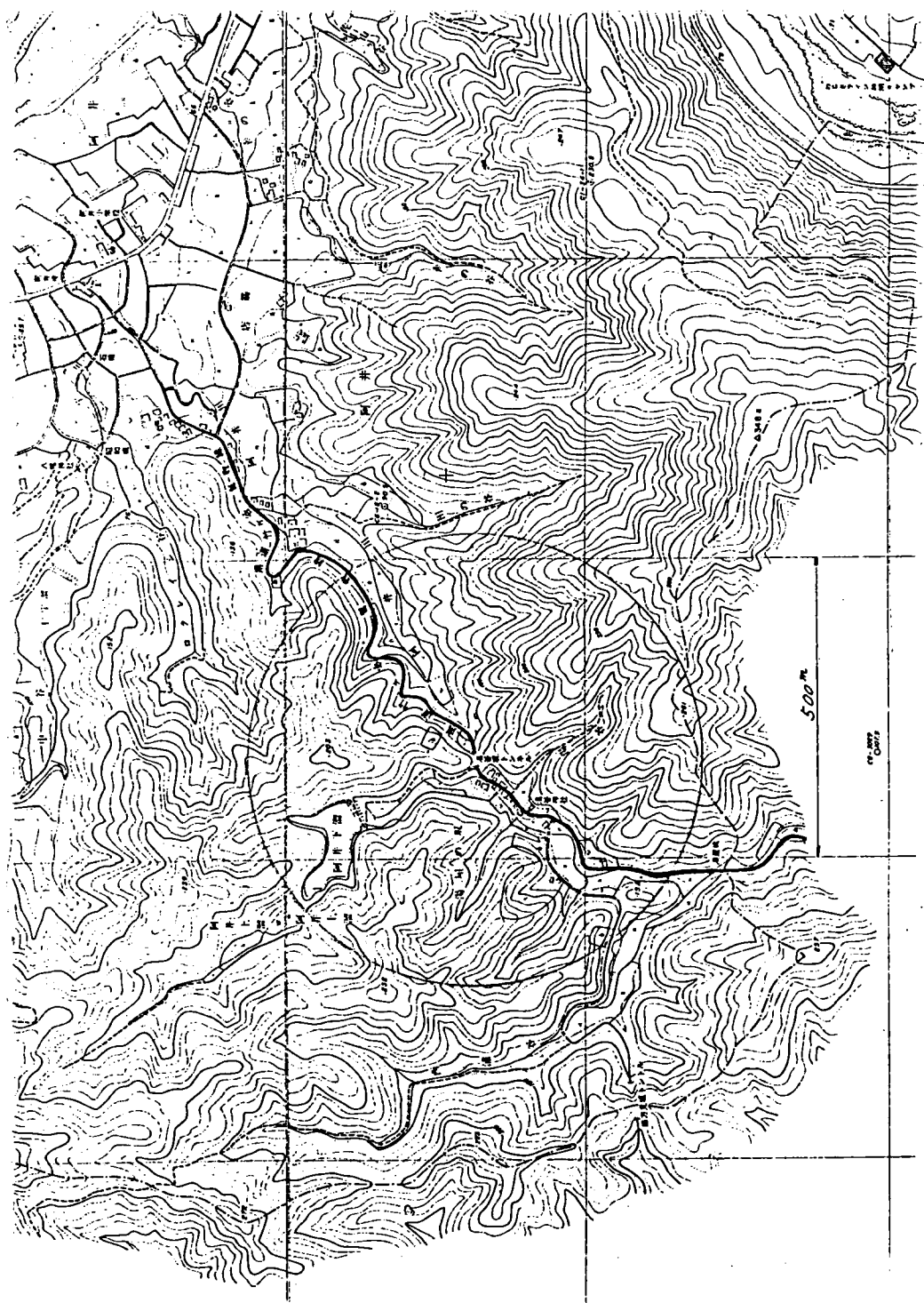


图 7-26 实验对象地域

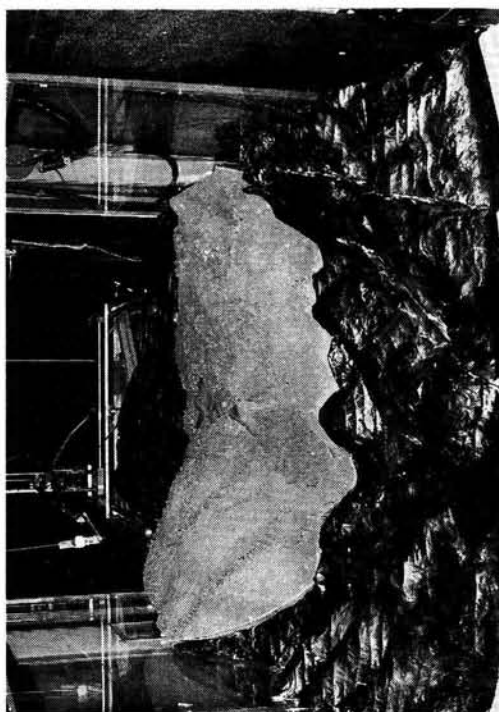


写真7-2 補助模型概略

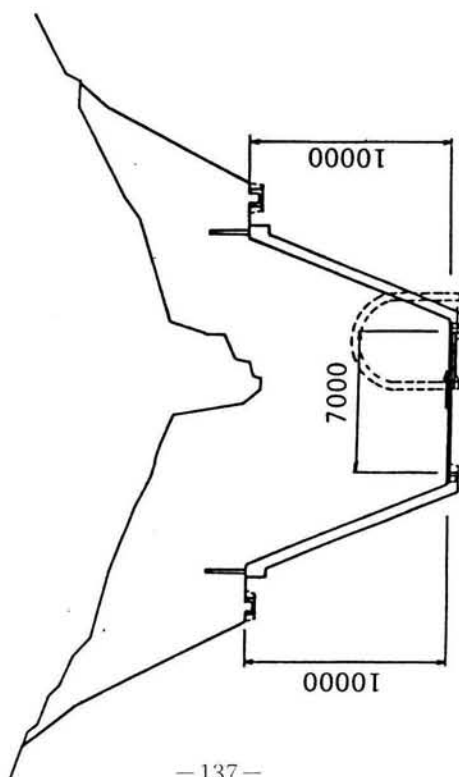


図7-27 工事前後の横断面形

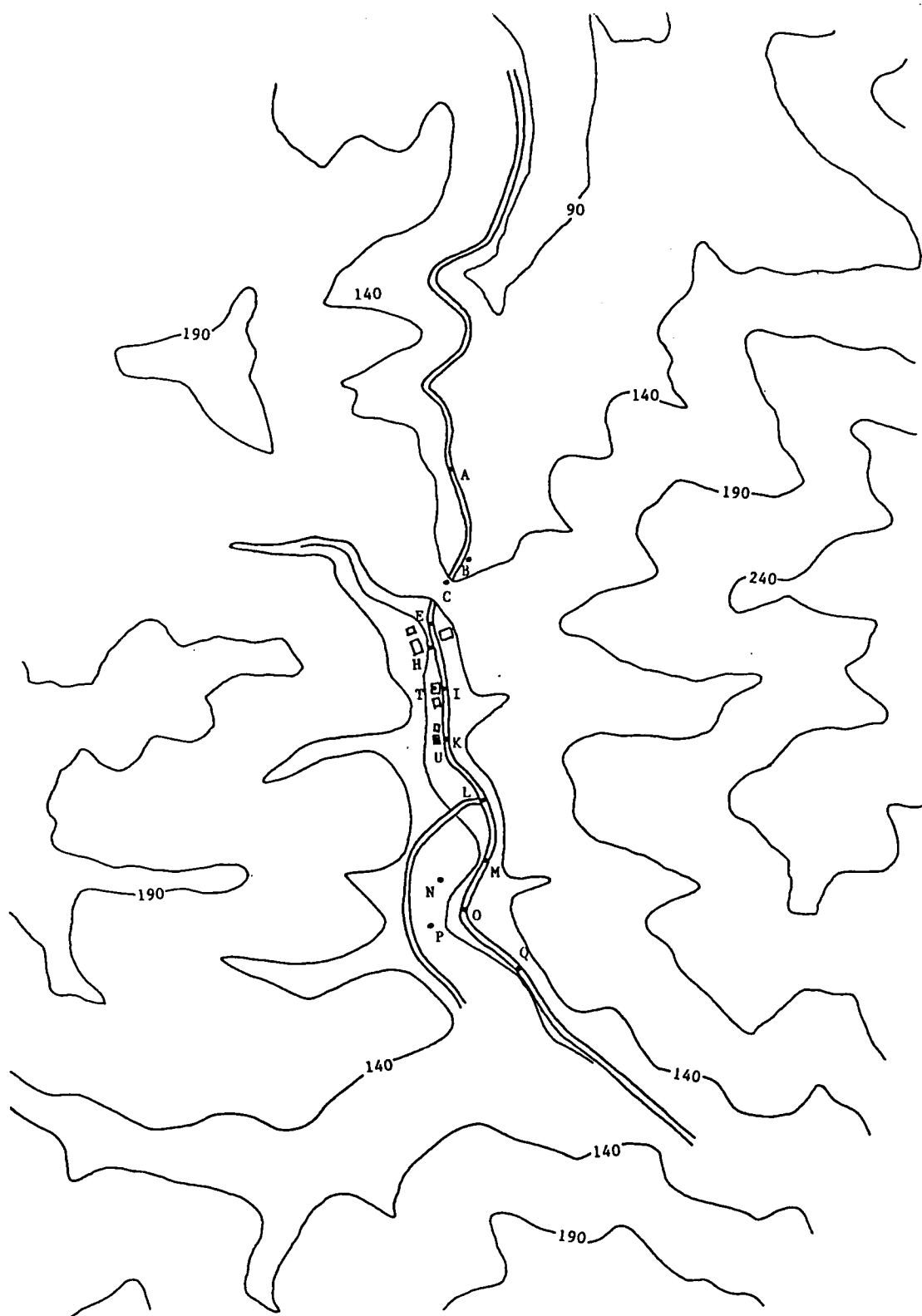


图 7-28 风速计测点

図7-29は、風向をパラメータとして工事前後における道路上測点の地上5m (㊸図) 及び、2.5m (㊹図) における各測定高さの接近流速で基準化した風速(増速率)を示したものである。

工事前の各風向における風速分布特性は以下のようなものである。

- ①トンネル上の測点Cにおいて、谷幅が極端に狭まることによる収束効果によって各風向共に増速率が大きくなる。
- ②トンネル下流側の風速は、風向が北東から東に偏るほど減少する。この現象は、トンネル部を越流した気流が剥離した後、主風向方向に流下し、主風向と道路の走行の一致している北東の風向時に強風となり、風向が異なるほど風速が減少している。なお、測点I付近(道路の標高がこの周辺で最大となる。)で増速しているのは、剥離流が地上に再付着したためであると考えられる。
- ③南西の風向では、谷幅が狭まる測点K付近で最大風速が生じ、トンネルに近づくにつれて家屋等の影響を受け、風速は減少する。
- ④そして、工事後には、東寄りの風向において、測点Cにおける風速が接近流速の約2倍となる。また、切通しの直背後の測点E、Hの増速率も非常に大きくなり、切通し部に収束した気流の影響を大きく受けている。そして、この工事の影響範囲は、測点K付近までである。
- ⑤また、南西の風向においては、東寄りの風向と同様に測点K付近から工事の影響が表われ、増速率が工事前と比較して若干増加している。

次に、工事前後の地形特性の変化に伴う増速率の変化に注目すると、前節において検討した単純化した谷、及び、切通し状地形において得られた結果と比較できる。すなわち、切通しの幅Wの拡幅に伴って、増速される領域が下流側に拡がり、増速率は、測定高さが低いほど大きくなり、単純化地形における現象と一致している。また、東寄りの風向では、谷の下流側に山が存在し、谷を形成する左右の地形も平坦な台地状地形ではないものの、工事後の道路上の測点の風速分布は、単純化谷状地形で得られたものと類似しており興味深い。ただ、得られた増速率は、 $Az=2.3, 2.2$ ($z/H=0.025$, $z=2.5\text{m}$ 、 $z/H=0.05$, $z=5\text{m}$) 及び、ここには示していないが、測定高さ10m($z/H=0.1$)における増速率は、1.8 (なお、周辺部の平均的な相対高さHは100m、谷の勾配 θ は約45度と見なせるが、谷の先端部勾配 ψ は、地形が複雑であり単純化方法によって大きく値が変化し一概に決定できない。)であり、単純化モデルで得られた最大値 $Az=1.4$ ($W/H=0$, $z/H=0.1$, $\theta=45$ 度, $\varphi=60$

度)と比較して非常に大きい値となっている。この差の生じる原因として、地形模型実験の場合、谷の長さの定義が困難であるが、単純化模型における $L/H=20$ と比較すると短いことは明らかであり、谷の長さが短いほど増速率が大きくなることが単純化模型実験より得られており、谷の長さの違いが挙げられる。また、谷底に鉛直勾配(約5度の上り勾配)があり、なだらかな丘状地形であること、及び、谷幅が穏やかに狭まり、収束効果が大きくなっていることにも起因すると考えられる。さらに、実験に使用した気流が、べき指数 $\alpha=0.3$ と大きく、接近流の鉛直勾配が大きくなると丘状地形において増速率が大きくなるとのPearse⁷⁻⁸⁾らの研究報告もあり、これらの影響が重複していると考えられる。

上流側の谷先端部の勾配を、写真7-3に示すように模型化したときの北東の風向における工事後の高さ5mの増速率を、図7-30に示す。

谷における風況特性は、ほとんど変化していないが、測点C(定常な谷の開始点と見なせる測点)の増速率が若干増加しており、単純化地形模型における結果(先端部勾配 ψ の増加によって、増速率が上昇する。)と一致している。

また、風洞風速を変化させた場合の増速率を、図7-31に示したが、両者には、ほとんど差がなく、設定風速の風況特性に及ぼす影響は小さいことが示されている。

以上簡単に、山間部に存在する谷状地形の風況特性を、地形模型を用いて考察したが、地形が複雑であり、単純化地形模型実験結果との定量的な比較は不可能であるが、定性的な傾向は一致している。

今後、本研究対象地域のように地形因子が複雑に組み合わせられた地形において、各因子の増速効果の重ね合わせの妥当性について検討する必要がある。

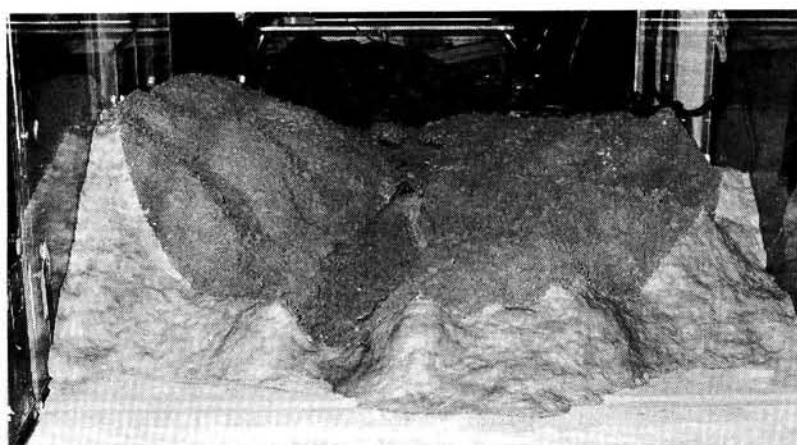
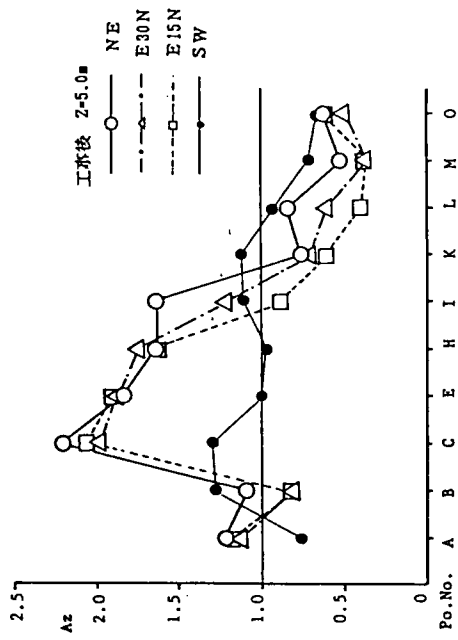
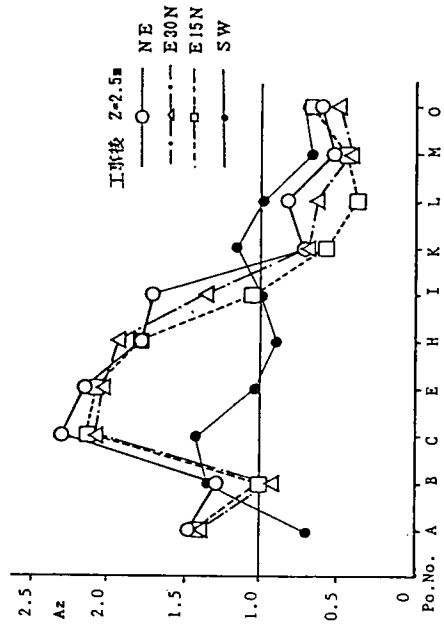
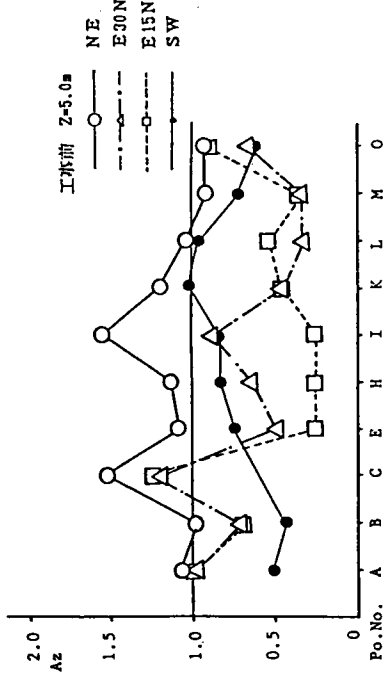
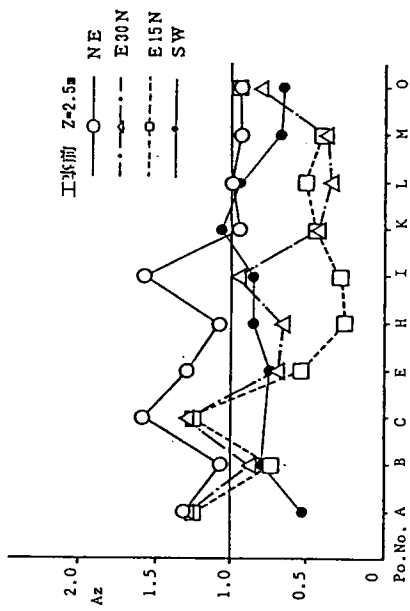


写真7-3 上流側補助模型を取除いた状態



⑥測定高さ 地上2.5m

⑤測定高さ 地上5m

図 7-29 道路上測点の風速分布 $Az=U(Z)/U_{\infty}(Z)$

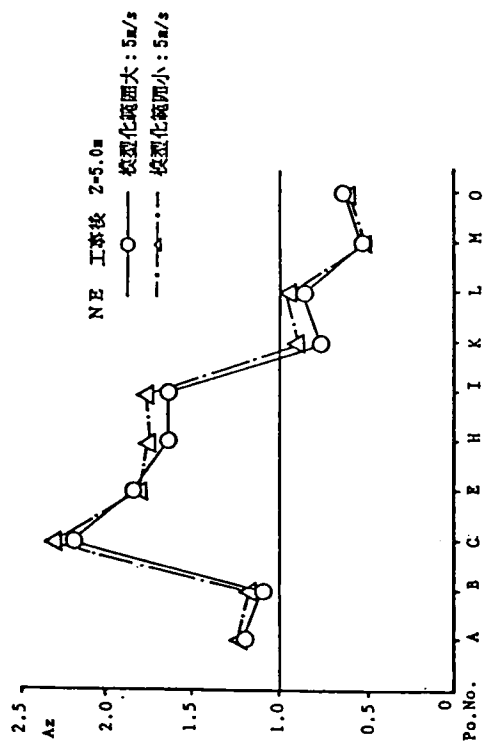
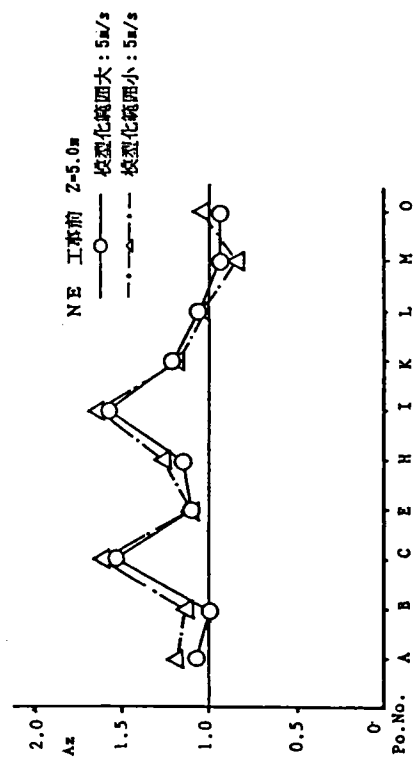


図 7-30 上流側地形の変化の風況特性
 に及ぼす影響 ($Az=U(Z)/U_{\infty}(Z)$, $Z=5m$)

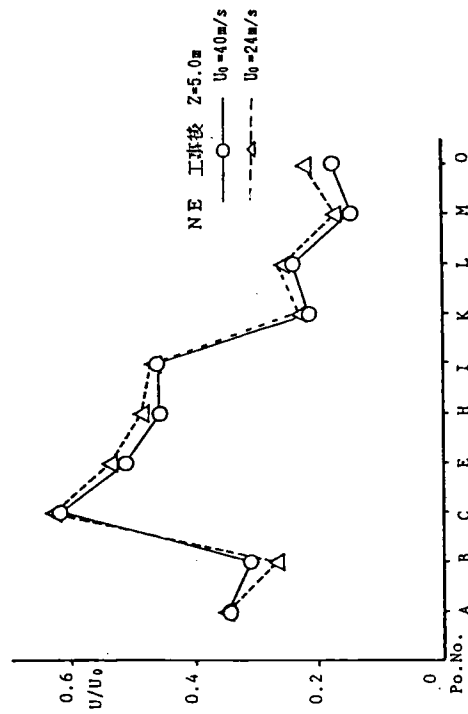
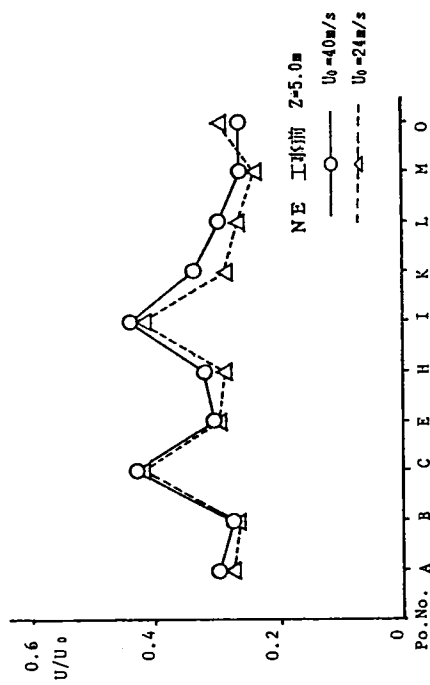


図 7-31 実験風速の風速分布に及ぼす影響
 ($U(Z)/U_0$, $Z=5m$)

7-3-2 複雑な切通し状地形における風況特性

本研究で対象とした地域の概略を図7-32に示す。対象地域は、内海と外海に囲まれた北西から南東に扇状に広がる平野部であり、内海とは南北に走る標高60~200mの尾根によって隔てられている。従来より、住宅、農地の周辺部に生垣等の防風フェンスが設けられており、台風や季節風の影響を受易い地域である。図中の破線は、新たに建設された道路であり、尾根の中央の切通しは道路に沿って南北方向に拡幅され、風環境が著しく変化することは明らかである。また、図中の円内が地形模型化領域であり、縮尺は、1/1,500である。また、工事前後で風況特性が大幅に異なる結果となった北西方向の風に対しては、上流側に位置する半島部も模型化して実験を行った。風洞内の境界層乱流はスパイヤを用いて模擬し、平均風速の鉛直分布を示すべき指数 α は、約0.17であり、乱れの特性は、2-3節に示している。実験風速は、乱流レイノルズ数の一致条件より導かれる $1/3$ 乗則⁵⁾を用いて、境界層外風速が50m/sとなる風洞風速4.4m/sとした。なお、このときのRe数は南側の山頂の標高(198m)を代表長に用いると 3.9×10^4 となる。

また、現地強風観測は、冬期の季節風が比較的強く作用した1986年1月22日、2月15日、2月19日、3月1日、及び、1988年2月6日の合計5回実施した(図7-33に各日の地上天気図を示す。)。計測点は、図7-34に示すように対象地域を約100m間隔の格子の交点とし、実測点は現地の状況を踏まえ図中丸で囲った点の近傍とした。測点名は、内海と外海(北西から南東)を結ぶlineに1桁のline名を付し、山の尾根に平行なline(北東-南西)を10~90のline名とし、各交点におけるline名の和で示している。使用した風速計は超音波微風向風速計2台、2成分Gill型風速計1台、及び、無指向性のトランジスタ(Tr)式風速計3台(風向は風速計を支えるボールの頂上に設置した矢羽根により計測した。)であり、図7-34に示す内海側測点35を固定点とし、Gill型風速計及びTr式風速計を切通し下流部平野測点(丸印)を順次移動することにより計測した。各測点において得られた平均風速値は、同時刻に測定した測点35の平均風速値により無次元化して比較検討する。また、切通し部に新たに建設された車道本線上においても風向風速の計測を実施した。なお、すべての計測時間は10分とし計測高さは地上5mとした。なお、1988年2月6日の観測は、写真7-4に示すように、小型貨物車の荷台に風速計を取付けて実施したため、1986年度の観測点と若干異なり、風洞実験において風速を測定していない測点もあり、現地観測点に測点を合わせた風洞実験も防風対策後の状態で行なった(図7-35に観測点を示す。))。

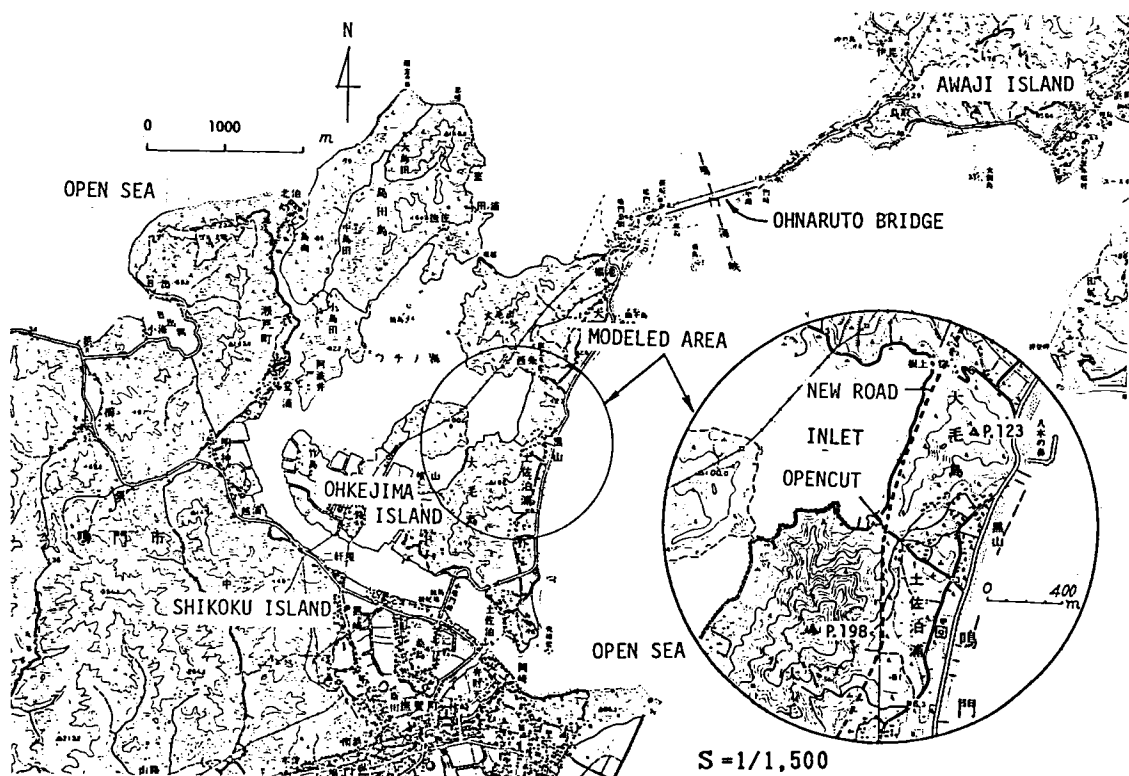
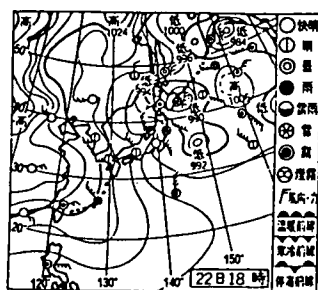
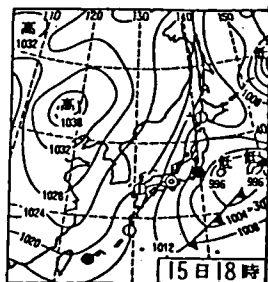


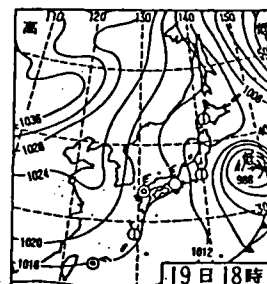
図7-32 実験対象地域概略



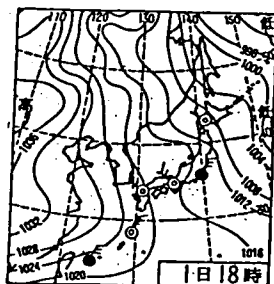
昭和61年 1月22日



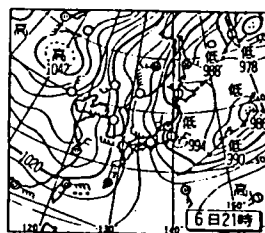
昭和61年 2月15日



昭和61年 2月19日



昭和61年 3月1日



昭和63年 2月6日

図7-33 地上天気図

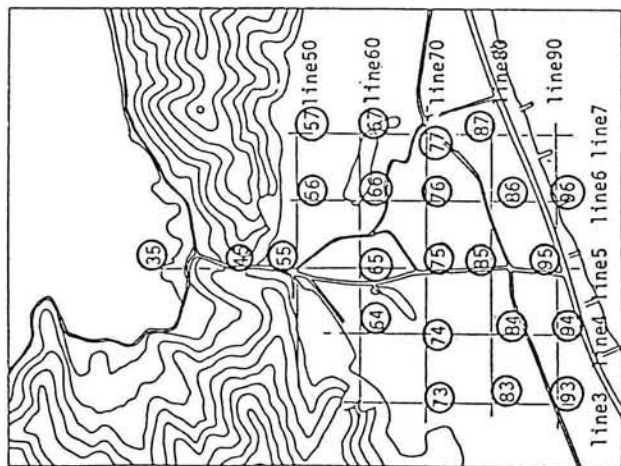


図 7-34 風向風速計測点

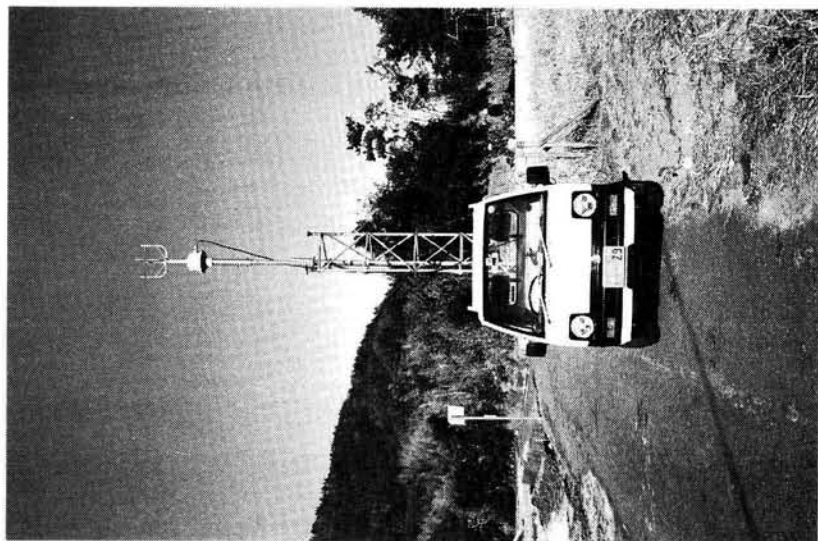


写真 7-4 風向風速計設置状況

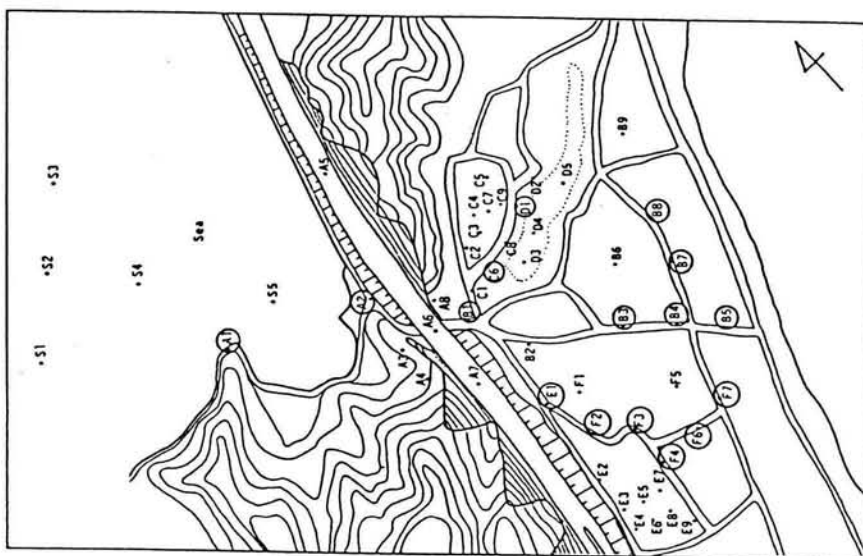


図 7-35 現地観測点 (○印)

(a) 縮尺地形模型実験結果及び考察

実験は数種類の風向に対して実施したが、対象地域において切土工事の風況への影響が著しい北西周辺の3風向(NW、NW15N、及び、NW20W)について示す。

まず、図7-36は、北西風が作用した時の上流側測点Pt. 35の風速で基準化した切通し下流側平野部の地上5mにおける工事前後の無次元風速ベクトル(U/U_{35})を示したものである。なお、図中の括弧内の数値は、工事前の風速からの変化率を%表示したものである。

工事前には、切通し部から平野部に流れ込んだ風は、line 4、5付近を中心として扇状に拡散し、内海から外海に結ぶ道路(ほぼline 5に一致する。)の北側は、尾根の後流となり弱風域となっている。図に示すような切通し中心部に新たな道路が建設され、切通し部の変則的な拡幅(北側の尾根は西側が、南側の尾根は東側の斜面がそれぞれ切土されている。)により、南側平野部(line 3、4)における風速は、単純化模型で見られた切通し幅の拡幅による増速効果と切通しの形状変化による導流効果も加わって大きく増加(約30~60%)している。一方、line 5より北側の平野部における風速(特に、line 5上の測点)は、切通し部が拡幅されたにも拘らず、工事前よりさらに減少しており、切通し部の形状変化による導流効果が大きいことが伺え、複雑な形状を示す地形に対する風速予測の困難さが再確認できる。また、図◎には、試行錯誤的に求めた防風対策を施した状態(図中の太実線、F1、F2、F3、高さ6m、6m、2m、延長50m、100m、15m、充実率57%)の風速ベクトルを示したものであり、大幅に増速された工事後の風速値が工事前の風速値にほぼ回復している。ただ、測点73付近においては、フェンスの導流効果によって工事後の風速より強い風が作用している。この件に関しては、模型が小縮尺であるためフェンスの透過性に関する相似性の問題もあり、導流効果が過大に評価された可能性も考えられ、現地観測等による調査が必要である。

図7-37、38は、それぞれ、北西から北及び西に15度風向が偏った時の工事前後の風速ベクトルを示したものである。

北西から北に風向が偏ると工事前後を問わず北側の尾根を迂回或は越流して気流が作用している様子が風向分布より伺える。そして、工事後において、北側の尾根の勾配が大きくなることに起因して尾根からの剥離が強くなり、平野部における上流域(line 7)において増速されている。また、工事前には、切通し周辺部からの気流は、切通しからかなり離れた南側の山裾部(測点73付近)に作用していたが、工事後には、切通しの大幅な

拡幅により、南側平野部の風速が大幅に増速されることが予想されるが、計測した範囲においては測点64が若干増速されるのみであり、増速域が新たに建設された道路付近へ移動しているものと考えられる。

また、北西から西に15度偏った風向においては、工事前後共に、尾根の後流に属する弱風領域がほとんど見られず、平野部は南側の尾根を越流した流れ並びに南側山裾に沿った強い流れが見られ、北西周辺の風向において最も強い風が観測されている。工事前後の風況を比較すると、まず、工事後にいて切通し直背後の測点の風速は減少し、作用方向も大きく異なっているが、他の測点における風向には大きな差は生じていない。北側平野部の風速はほとんど変化せず（若干減少傾向が見られる。）、南側平野部（line 3-5）の風速がかなり増加（10-50%）している。また、ここには示していないが北西風に対して有効に機能していた防風フェンスは、この風向においては、北側平野部に対して若干風速低減効果があるものの南側平野部に対してはほとんど効果のないことも確認されており、平野部の風況を主に支配するのは、風向分布より明らかなように南側の尾根を越流する流れであると考えられ、工事によって切通し部の高さが低下したことによる影響が大きく反映されているようである。なお、この点については、本章の7-4-2 項において（模型化範囲の風況特性に及ぼす影響）、上流側地形特性の及ぼす影響と併せて検討する。

以上簡単に、一般的な地形における切通し拡幅前後における切通し下流部の風況特性を縮尺地形模型を用いて調査した結果をまとめたが、定性的ではあるものの単純模型実験において得られた結果の一部が検証できたものと考えられる。なお、一般的な切通しの工事前後の変化は、勾配（上下流側尾根の法面・開口部）・幅・高さ・開口方向等非常に複雑となり、また、周辺地形の影響も決して無視できず、本研究に示したように僅かな風向の変化によっても風況は著しく変化することが明らかであり、定量的評価を行なうには、前述のように切土の形状・風向等の及ぼす効果のより詳細な調査に基づき、各因子の総合的評価が必要となる。また、従来使用されている地形因子のみでは、僅かな風向の変化によって著しく風況特性が変化する切通し周辺の風況特性を精度よく推定することが困難であることも予想され、この点についても適切な因子の確立が望まれる。

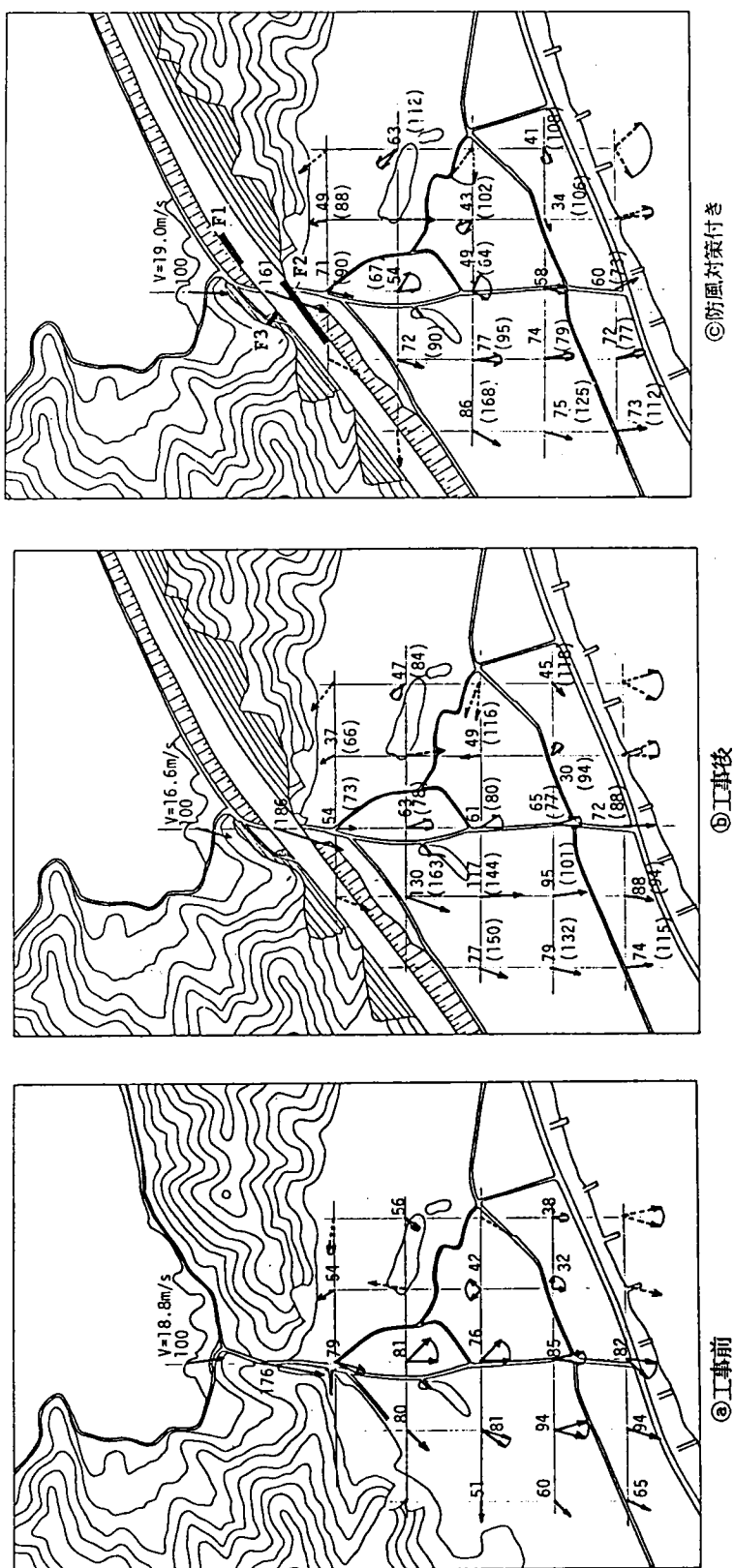
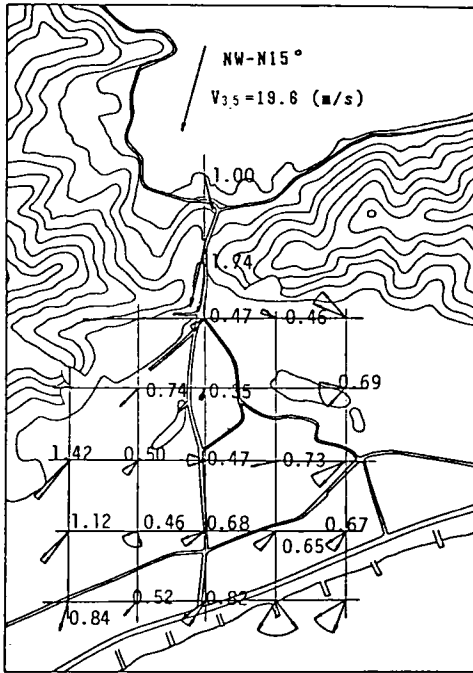
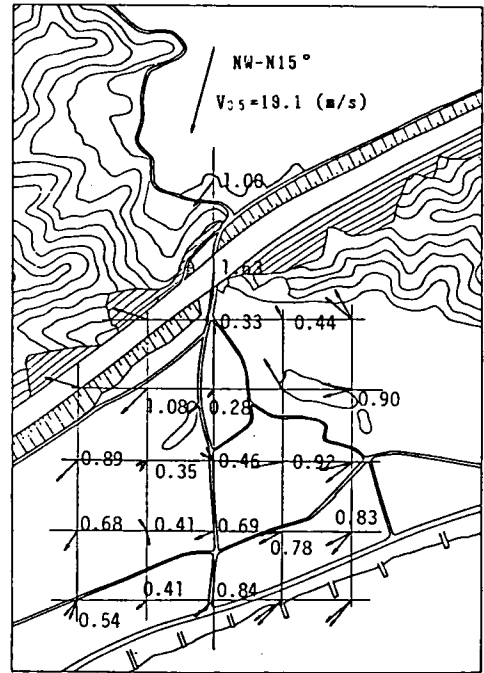


図 7-36 平野部風速ベクトル (NW, $U_0 = 5 \text{ m/s}$)

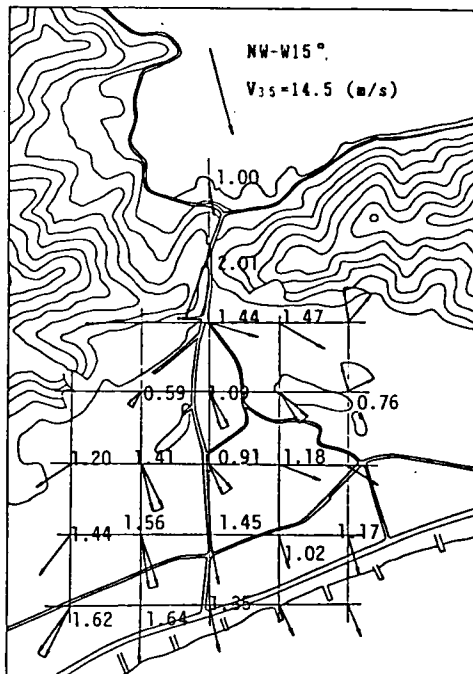


㊐ 工事前

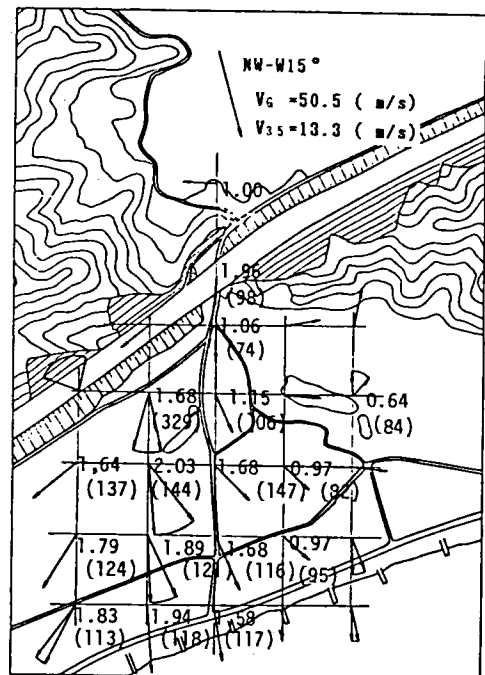


㊑ 工事後

図 7-37 平野部風速ベクトル (NW15N, $U_0 = 5 \text{ m/s}$)



㊐ 工事前



㊑ 工事後

図 7-38 平野部風速ベクトル (NW15W, $U_0 = 5 \text{ m/s}$)

(b) 縮尺地形模型実験の妥当性（現地観測による検証）

I. 変動気流特性

図7-39は、観測された変動風速のパワースペクトルの一例を風洞実験結果と共に示したものである。両者共に等方性理論より導かれるKármán型スペクトル⁷⁻⁹⁾（図中の実線で示された曲線）によく一致している。また、乱れのスケールとしてKármán型スペクトルより得られる値を用いた場合には修正Kaimal型スペクトル⁷⁻¹⁰⁾（図中の破線で示された曲線）にも良く一致している。表7-3は、1986年1月22日における平均風速、乱れの強さ、スケールの観測値と実験値を比較したものであり、表7-4には、1988年2月6日における測点E1（測点64とほぼ対応した測点）の平均風速を用いて無次元化された平均風速 V/V_{E1} 、乱れの強さ I_u 、ガストファクタG.F.（最大瞬間風速と平均風速の比）の観測値及び北西の風向における実験値も併せて示した。

乱れの強さは、実験値が若干大きめであり、乱れのスケールは、観測値が大きくなっているものの、両者ともによく似た分布特性を示している。また、瞬間風速の大きさを示すガストファクタは、瞬間を定義する風速計の応答速度に、大きく依存することが知られているが、実験値と観測値には大きな差がないことより、実験値の評価時間を適当に調整することによって、最大瞬間風速の推定も可能であると判断できよう。

また、各測点間の変動風速の相関性に関しては次のようなことが明らかとなった。

- ①測点64、73、74、83、84（北西風時に比較的強い風が作用する測点）間には、類似した変動特性があり、これらの各測点に作用する風は、ほぼ同一経路をたどっている可能性が強い。
- ②同一流線上に位置すると考えられる測点間においては、弱い風が作用する場合にも、相関は高くなる。
- ③基準測点35と下流側平野部測点間には、類似した変動特性が見られる場合もあるが、一般に、相関は低くなっており、下流側平野部に作用する風は、尾根を越流する風、或は異なる方向からの風が複雑に関与するとともに、各測点近傍の地物の影響を強く受けている。

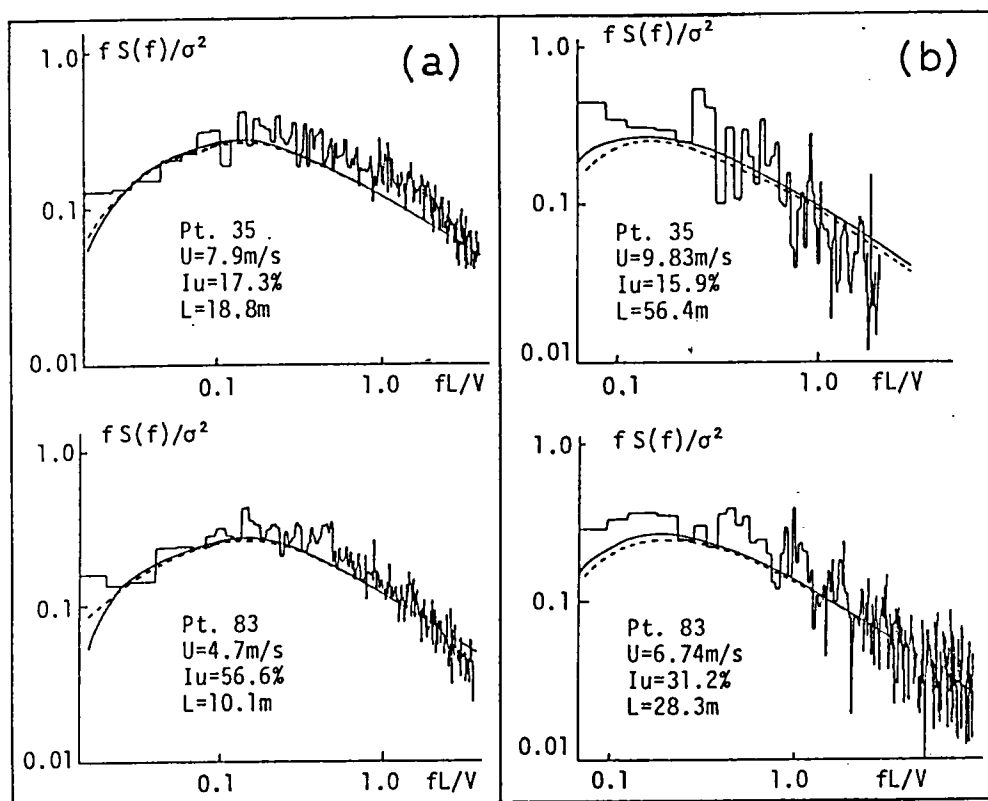


図7-39 変動風速のワースペクトル

(a) 風洞実験, (b) 現地観測結果 (—— Kármán 型, ----- Kaimal 型)

表7-3 昭和61年 1月22日の変動風特性と実験値(NW)の比較

	Point	35	73	74	83	84	85
Full scale measurement	U (m/s)	9.83	6.63	7.57	6.74	4.77	13.7
	I_u (%)	15.9	33.8	33.5	31.2	44.4	20.0
	L (m)	56.4	15.8	23.1	28.3	20.2	83.2
Wind tunnel measurement	U (m/s)	7.9	6.3	4.9	4.7	5.3	15.6
	I_u (%)	17.3	55.6	64.2	56.6	55.9	17.4
	L (m)	18.8		15.6	10.1		24.6

表7-4 昭和63年 2月 6日の変動風特性と実験値(NW)の比較

平野部測点	A1	A2	B1	B3	B4	B5	B7	B8	C6	D1	E1	F2	F3	F4	F6	F7
1988 V/V_{E1}	1.19	1.77	0.82	0.82	0.94	0.96	0.61	0.64	0.38	0.52	1.0	0.94	1.16	1.26	1.26	1.13
2.6 I_u				56.2	38.3	35.4	52.2	55.2				36.6	29.7	33.5	27.8	26.5
観測値 G.F.	1.66	1.41	2.30	2.77	2.52	2.42	3.70	3.41	3.17	1.94	2.07	2.52	2.03	2.35	1.90	1.96
NW V/V_{E1}	1.60	1.47	0.76	0.80	0.75	0.76	0.58	0.65	0.49	0.65	1.0	1.22	1.01	1.09	1.11	1.04
I_u	19.3	18.5	49.6	61.6	65.6	65.0	73.2	63.6	65.4	57.7	38.1	31.2	36.7	33.6	34.6	40.7
実験値 G.F.	1.40	1.40	1.82	2.50	3.42	2.84	2.87	2.87	2.49	2.23	1.79	1.65	1.80	1.57	1.77	1.84

Ⅱ. 切通し部道路面上の風向風速分布特性

図7-40は本線上の風向風速測定結果を示したものであり、前出の図と同様に測点35の風速値で無次元化している。北側切土法面に設置するフェンスの有無(図②、③、それぞれ、法面フェンス設置前及び設置後)により本線上の風速分布が大きく異なっている。

即ち、法面フェンス設置点の下流部の測点においてフェンス設置前には測点35の1.3倍あった風速がほぼ測点35と同じ値に低下している。これは、法面フェンスにより側道から本線上に流れ込んでいた風が上空へと押上げられ、工事によって低くなった山の稜線を越流する流れをもさらに上空へと導いていることに起因するものと考えられ、模型実験の可視化結果とも一致している。

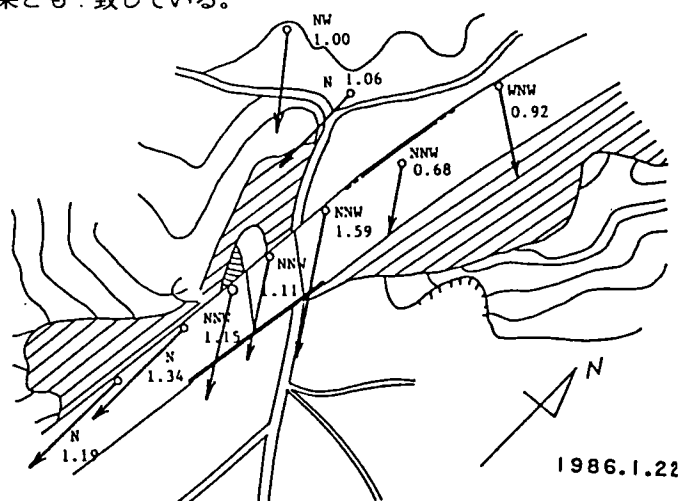


図7-40 ② 1月22日本線上風向風速分布図

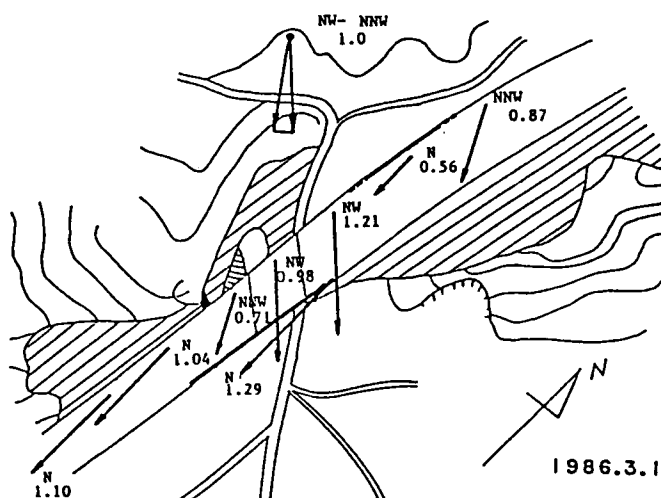


図7-40 ③ 3月1日本線上風向風速分布図

Ⅲ. 平野部風向風速分布特性

下流側平野部の風向風速計測結果を測点35及び測点E1（測点64近傍）の風速値で無次元化した風速ベクトルとして図7-41に示す。なお、1986年の観測は道路工事中であり、1月22日の防風対策施設は、路面上の上下流フェンスのみの状態であり2月15日、19日はさらに法面フェンスが設置され、3月1日においては、側道に立入り禁止用のフェンスが設置され、防風対策が終了した状態であった。そして、1988年の観測（2月6日）は、工事が全て終了し、供用開始後の状態である。

1986年1月22日、2月19日、3月1日、及び1988年2月6日における各風向は、ほぼ北西となっており、観測された各平野部測点の風向も類似している。また、これらは、前節に示した縮尺地形模型の対策後（図7-36㉔）の風速ベクトルとも良く対応していることが認められる。また、㉔図に示す2月15日の観測結果と前出の図7-37㉔に示す風向を北西から北に15度傾けた場合の実験結果は、基本風速が異なるものの非常に類似した風向風速分布を示している。

これらの風向風速分布より、風洞実験の妥当性が示されているものと考えられるが、より詳細に検討したものが図7-42である。この図は、昭和63年2月6日に実施した現地観測結果（測点E1の平均風速で無次元化された値）と、風向が北西周辺における同様に無次元化された風洞実験結果との比較を行なったものであり、相関係数も併せて示されている。

観測値と北西風の風向における実験値は、非常に高い相関を示しており、風洞実験の妥当性が示されているものと考えられる。また、観測値は、各実験値とも比較的良好な相関を有しているが、前述の地形模型実験間の風向特性に依存する平野部の強風特性を反映した結果となっており（例えば、北西風では、南側平野部で風速が高くなり、北側平野部で風速が低下すること、また、風向が北西から西に偏ると、平野部全般において北西風時より増速傾向を示しており、特に、20°西に偏った風向では、実験値が明らかに過大評価となっている。また、北西から北に偏った風向では、南側平野部測点において実験値が過小評価となり、北側平野部では逆に、若干過大評価となっている。等）、実験値と観測結果の相関性から、逆に、観測時の風向を求めることが可能であると考えられる。

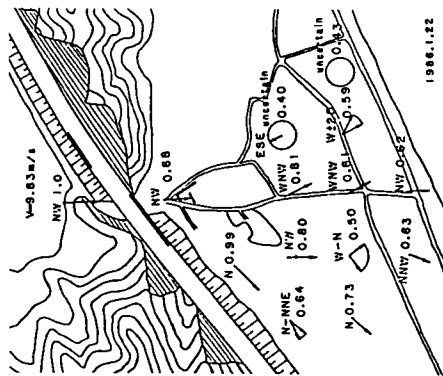
風洞実験と1988年2月6日の観測は、上述のように良好な対応を示しているが、風洞実験の妥当性を検証するには、データ不足であると考えられるため、1986年に実施した現地観測結果（観測点が一部実験の測点と若干異なっている。）に対して、風洞実験結果との相

関性について調査した結果の一例を図7-43に示す。

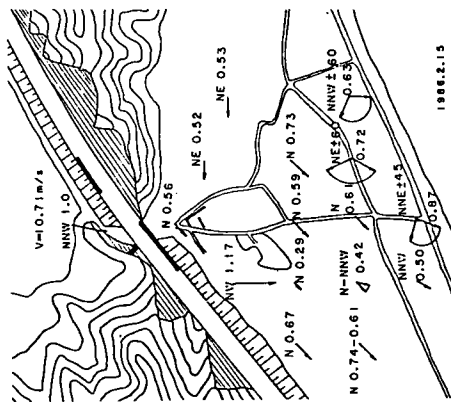
④図に示す1月22日の観測値とNW10Wの風向における実験値の相関は、観測における測点E1が、風洞実験測点と20m程度異なる位置であり、得られた測点E1の風速値が他測点と比較して特に大きかったため（なお、測点64で観測値が大きくなるのは、法面フェンスが未設置であることによる影響も考えられる。）、両者において、ほぼ同じ測点である測点F4の風速値を用いて規準化している。前出の1988年の観測結果と比較すると、実験値との相関が非常に低くなっている。これは、現地観測点と実験測点が若干異なることに起因して、周辺地物の影響が変化することに対応していると考えられる。すなわち、現地観測では、丘の後流に位置していた測点（F2, F6）が、風洞実験では測点が若干異なるために後流域からはずれていること、また、海岸線の松並木の影響が過大評価される（測点B5）など測点周辺の地物の及ぼす影響が大きいものと考えられ、これらの測点のデータを除いた場合の相関は $r=0.64$ となり、比較的良い対応を示していると判断できる。

⑤、⑥図は、それぞれ、2月19日と3月1日の観測値と風洞実験結果（NW, NW10W）の比較を示したものであり、測点E1の風速値で規準化している。両風向ともに、観測値と実験値の相関は高いものの、2月19日においては、45°の直線より勾配が大きく、3月1日の観測に対しては、逆に、緩やかとなっている。これは、便宜上測点E1を基準点として規準化したためであり、実験値と観測値には良い対応関係が存在していると考えられる。

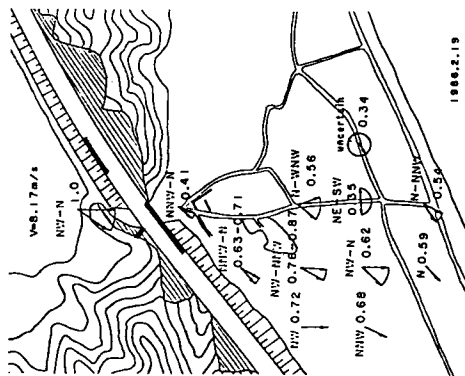
以上、現地観測と縮尺地形模型を用いた風洞実験結果の対応関係について、平均風速、風向、乱れの強さ、スケール、変動風速のパワースペクトル、ガストファクタ等について検討してきた結果、自然風を模擬した境界層乱流中で実施した風洞実験は、実現象を的確に再現できると判断できよう。ただ、実験に使用した防風フェンスは、実際と同様に60%程度の充実率であるが、測点73に相当するF2における実験値は、観測値を多少過大評価しており、現実のフェンスよりも若干遮蔽効果が大きくなる可能性もある。



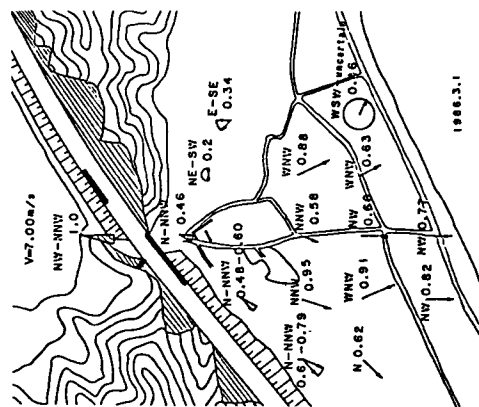
③昭和61年 1月22日



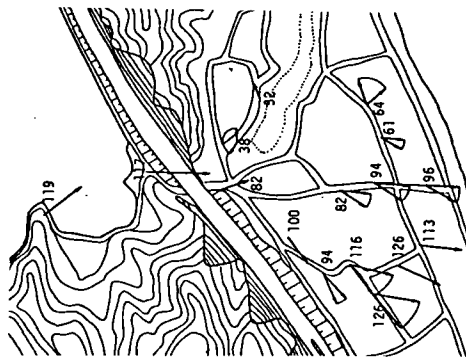
⑤昭和61年 2月15日



⑥昭和61年 2月19日

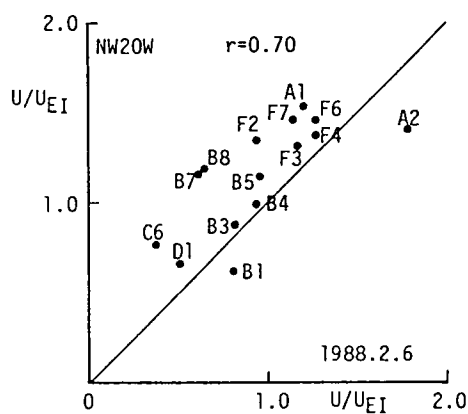


④昭和61年 3月 1日

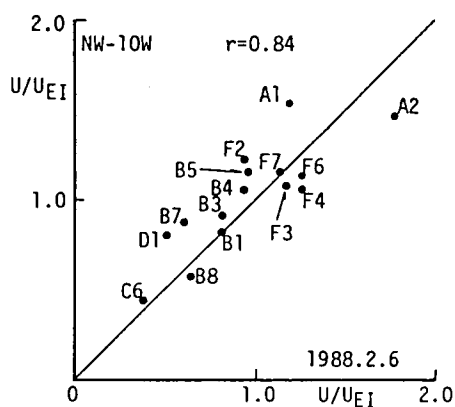


昭和63年 2月 6日

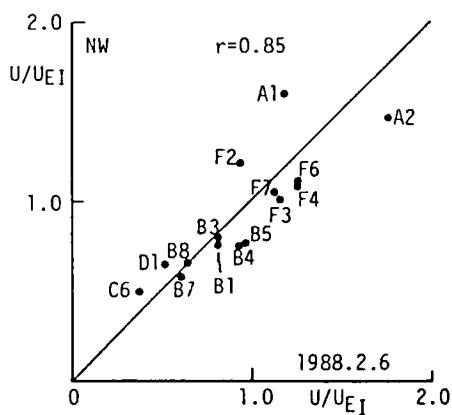
図7-41 現地観測結果



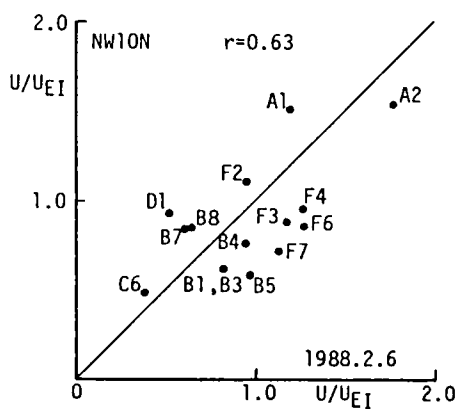
㊐風向 NW20W



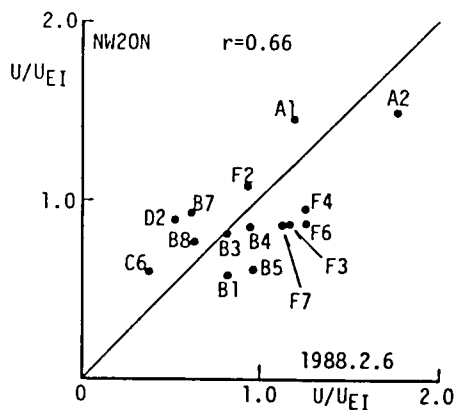
㊑風向 NW10W



㊒風向 NW



㊓風向 NW10N



㊔風向 NW20N

図 7-42 昭和63年2月6日観測結果と風洞実験の相関 (U/U_{EI})

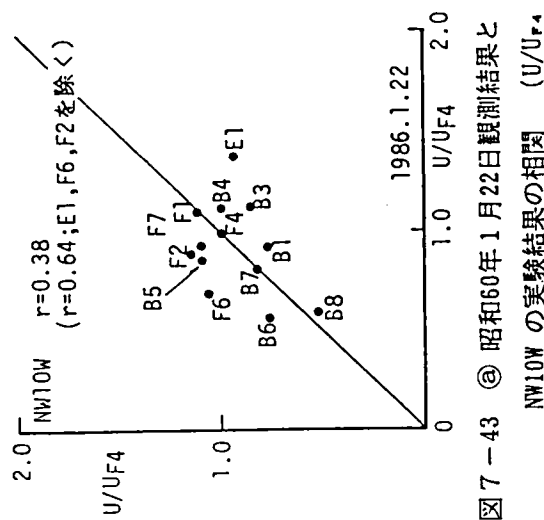


図 7-43 ㊤ 昭和60年1月22日観測結果と
NW10W の実験結果の相関 (U/U_{F4})

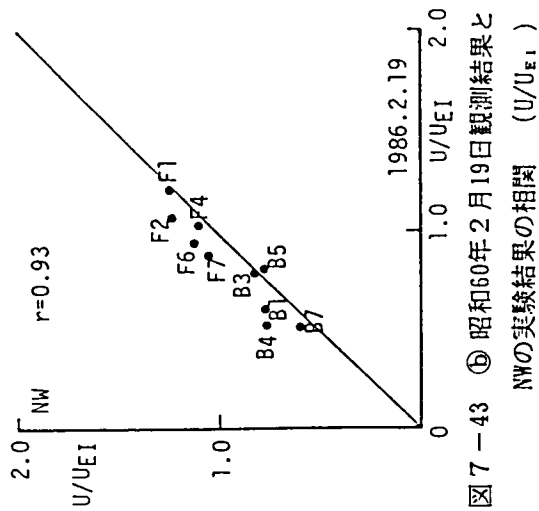


図 7-43 ㊥ 昭和60年2月19日観測結果と
NWの実験結果の相関 (U/U_{E1})

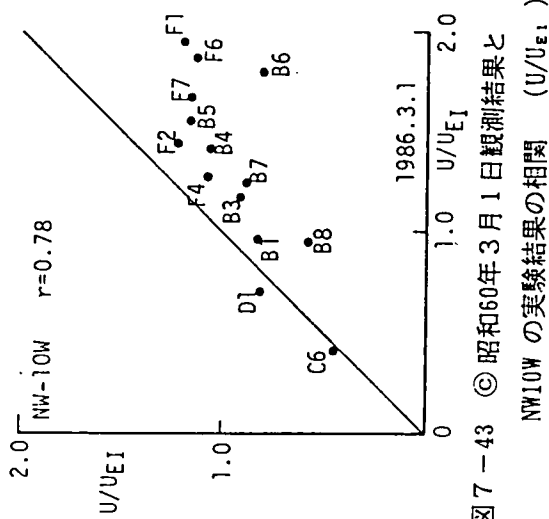


図 7-43 ㊦ 昭和60年3月1日観測結果と
NW10W の実験結果の相関 (U/U_{E1})

7-4 地形模型を用いた風洞実験法に関する2、3の考察

複雑な地形における風況予測に対して縮尺地形模型を用いた風洞実験は、有効な手法であることが知られているが、従来の研究において述べたように、実験手法に未だ不確定な問題点がいくつか残されており、風洞実験のみに基づいた風況推定では完全に信頼できる資料とはなりえず、現地強風観測を補完的に使用する必要がある。

本節においては、前節に示した切通しを有する地形を対象として、①模型化対象範囲が広くなり、模型縮尺が比較的小さくなるとき、現象を明確に捉えるために、鉛直縮尺を水平縮尺と異なる縮尺を用いて鉛直方向に拡大して調査するひずみ模型の有効性、②模型化範囲の決定方法と関連して、上流側地形の風況特性に及ぼす影響、③実験風速、及び、④境界層乱流特性の風況特性に及ぼす影響等について検討し、縮尺地形模型を用いた風洞実験法の確立に一助を成そうとするものである。

7-4-1 模型のひずみが風況特性に及ぼす影響

ひずみ模型は、高橋により提案され⁷⁻¹¹⁾、大気の渦動粘性係数が方向によって著しく異なることを、垂直方向に適当に拡大して考えると、等方性に引き直せるとされており、実際にも、ひずみ模型による実験例も過去いくつか報告されており⁷⁻¹²⁾、その都度一定の成果が修められているが、ここでは、ひずみ模型の有効性について、切通し状地形として前節に示した地域を対象とし、図7-44の大きな円で示される領域を模型化した縮尺1/1500のひずまない模型と小さな円を対象とした水平縮尺1/1000、鉛直縮尺1/500のひずみ模型を用いた風洞実験により、模型のひずみが風況特性に及ぼす影響を調査するものである。風洞内に自然風を模擬した境界層乱流の特性は、2-3節に示されているが、風速の鉛直分布を示すべき指数 α は、ひずまない模型($\alpha=0.17$)が、ひずみ模型($\alpha=0.13$)より若干大きくなっており、乱れの強さ、スケールも大きくなっている。

図7-45、46には、北西風に対する両模型における㊸工事前、㊹工事後、㊺対策後(本線上と南側尾根の法面に防風フェンスを設置したもの)の各測点の平均風速値を上流側基準測点の風速値により基準化した風速ベクトルとして示した。なお、測点番号は前出のとおりである。

両模型の風速ベクトル図は、各ケースとも類似した傾向が見られるが、以下に示すような相違点もある。

①下流部北側平野部line 6、7において、ひずみ模型では強い逆流域となっている。一方、ひずまない模型では逆流域が存在するものの風速値は小さくなる。

②工事によって増速される地点は、計測された範囲内においては、ほとんど差がないが、工事前に対する増速率は、ひずみ模型において大きい値となっている。

③防風フェンスは、両模型において効果的であることが示されているが、ひずまない模型のline 3上の測点に対しては効果が小さく、特に、測点73では、工事後の風速より大きい値となっている。

また、図7-47は、両模型間の風速の対応関係を示したものであり、この図より両模型間の相違点を抽出してみると以下のとおりである。

④工事前の状態では、比較的強い風速領域の測点間において良い対応が見られるが、工事後、対策後においては、ひずみ模型における測点74、83、84、94の各測点がより高風速となっている。

⑤ひずまない模型において低風速となる測点76、86、87は、全ての状態において、ひずみ模型の風速が高くなっている。

⑥逆に、測点65、75では、ひずまない模型の風速値が全て大きくなっている。

以上、両模型間の切通し下流側平野部における風速分布の相違点を列挙したが、模型製作精度、測定誤差、及び、境界層乱流特性が厳密には一致していないこと等に起因する相違点も存在すると考えられるが、その主たる原因として以下の要因が考えられる。

③相違点②、④は、鉛直方向に縮尺を拡大するひずみ模型においては、開口部下流の増速域が広がり、増速率も大きくなることに起因している。このひずみ模型の特徴は、前出の図7-20（7-2-2項）に示した水平縮尺が同一で高さの異なる3種類の台形断面の2次元丘の中央部に開口部を設けた単純化切通し模型実験結果と同一現象である。

①相違点①、⑤は、ひずみ模型では、山かげの負圧が大きくなること、さらに模型化された範囲がひずみ模型では図7-41に示すように実験対象平野部の両側の尾根のピークをかくうじて含む地点までであり、風洞側面の影響を考慮すると、さらに負圧が大きくなることが考えられる。一方、ひずまない模型は、北側の山全体を含む広範囲を対象としており、尾根によって遮蔽された地域への気流の回り込みが可能となっており、両者の尾根の下流側の負圧に大きな差が生じ、切通し下流部の北側平野部の風速分布が大幅に異なったものと考えられる。

⑥相違点③については、ひずまない模型が小縮尺(1/1,500)であり、防風フェンスをモデ

ル化したネットの充実率はほぼ一致しているものの、メッシュサイズがあまりに小さくなり、フェンスの導流効果がひずまない模型において過大評価され、路面下流側において風速が増大したものと考えられる。また、line 3に対しては、防風施設の風速低減効果が、ひずみの有無に無関係に弱くなっている。

- ④相違点⑥に関しては、測点65が切通し下流側の生垣に囲まれた民家の風下、測点75も民家が連なる丘の下流側であり、ひずみ模型の場合には、それらの遮蔽効果が過大に作用していると考えられる。

次に北西風と反対の風向となる南東風に対して同様の比較を行なう。

図7-48に両模型間の無次元化風速の相関を示す。また、図7-49には、ひずまない模型に対する無次元化風速ベクトルを示す。風向分布には両模型間に特に大きな差は生じていない。風速分布の相違点を抽出すると以下ようになる。

- ①平野部のほとんどの測点において、工事前後にかかわらず、ひずまない模型の風速値が大きい。
- ②反対に、測点35.67については、ひずみ模型の風速が大きい。
- ③また、工事前において、ひずみ模型における測点45の風速値はひずまない模型より大きくなっているが、工事後では、逆に小さくなっている。

以上、両模型間の相違点を抽出したが、その原因について、北西風の場合と同様に考えられる要因を列挙する。

- ④相違点①に対しては、南東風の場合、全体に平坦な地形であるため、ひずみ模型の鉛直ひずみによって、平野部の地物が拡大された影響が顕著に現れ、流れの剥離及び遮蔽効果が大きく作用していること、さらに、鉛直方向に拡大された切通しの両側の尾根（三ッ石山、黒山）が下流への流れをせき止める作用の2点より、ひずまない模型の方で風速値が大きくなったと考えられる。
- ⑥相違点②は、ひずみ模型の場合、黒山の高さがひずまない模型の2倍となり、黒山によって地表付近の流れはせき止められ、山裾にそって曲げられ切通し部へ流れるようになる。切通し部へ流入した流れは、北西風における原因④の効果により加速され風速値が増大するものと思われる。
- ③相違点③に付いては、平野部を流れる風が、三ッ石山、黒山の影響を受けて切通し部へ集められ、そこで縮流して風速は加速されるが、ひずまない模型においては、水平縮尺が1/1500と大きく、切通し部の間隔が狭くなりすぎ、開口部に集められた風が衝突し、

それによってエネルギーを失うため測点45の風速は低下している。一方、工事後においては、切通し部が拡幅され、増速するのに適当な空間が得られたため風速値が増大するものと考えられる。反対に、ひずみ模型では、工事前増速するのに適当な空間が確保されていたが、工事後、ひずみ模型は鉛直方向の縮尺を拡大しているため、切通し部の開削面積も大きく、大きな風道空間が確保できるため、風速値が小さくなったものと考えられる。この現象も、前出の図7-23に示す台形断面を有する単純化模型における開口部の幅を変化させた実験結果と一致している。

複雑な地形を有する本研究対象地域において、地形因子の風況に及ぼす影響が全く異なる風向に着目して、ひずみ模型の有効性、及び模型のひずみが風況特性に及ぼす影響について検討した結果は、地形因子を単純化した簡略地形模型において得られた結果と一致している。また、地表面付近の風速は、地物の影響（剥離、遮蔽効果）を大きく受けることにより、模型のひずみによって風況特性が異なることも示されている。したがって、ひずみ模型を用いた風洞実験による風況変化の定性的評価、或は、相対的比較は可能であるが、定量的評価には問題があるものが明らかとなった。

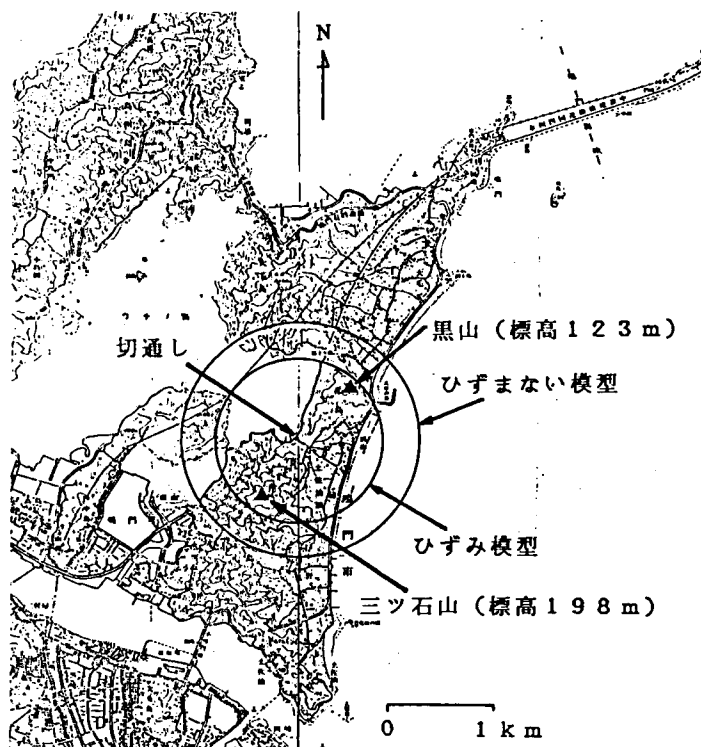


図7-44 模型化範囲

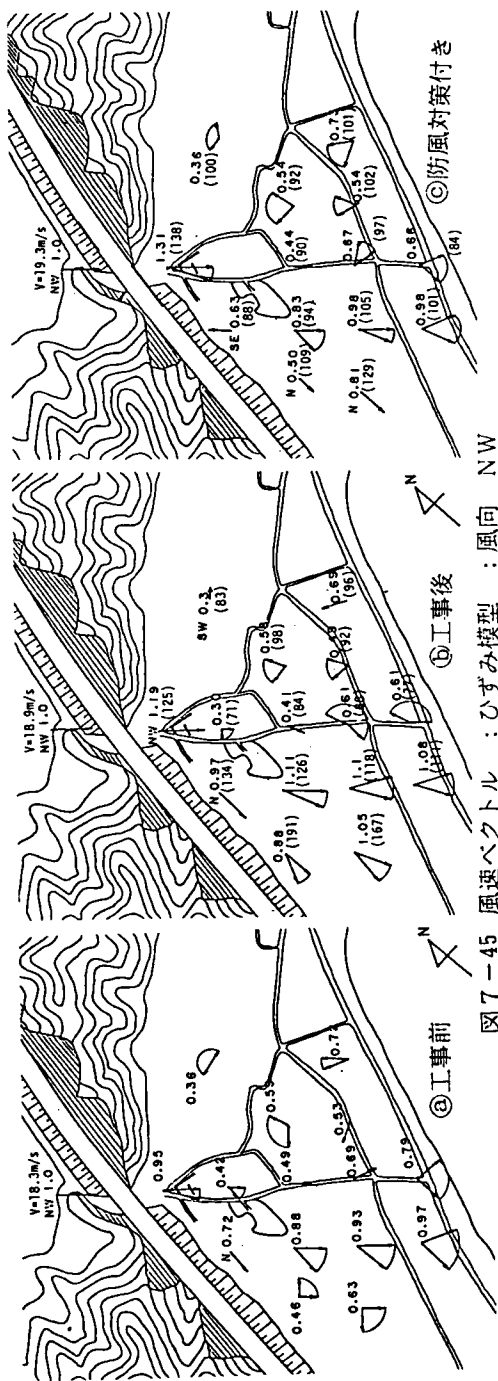


図 7-45 風速ベクトル : ひずみ模型 : 風向 NW

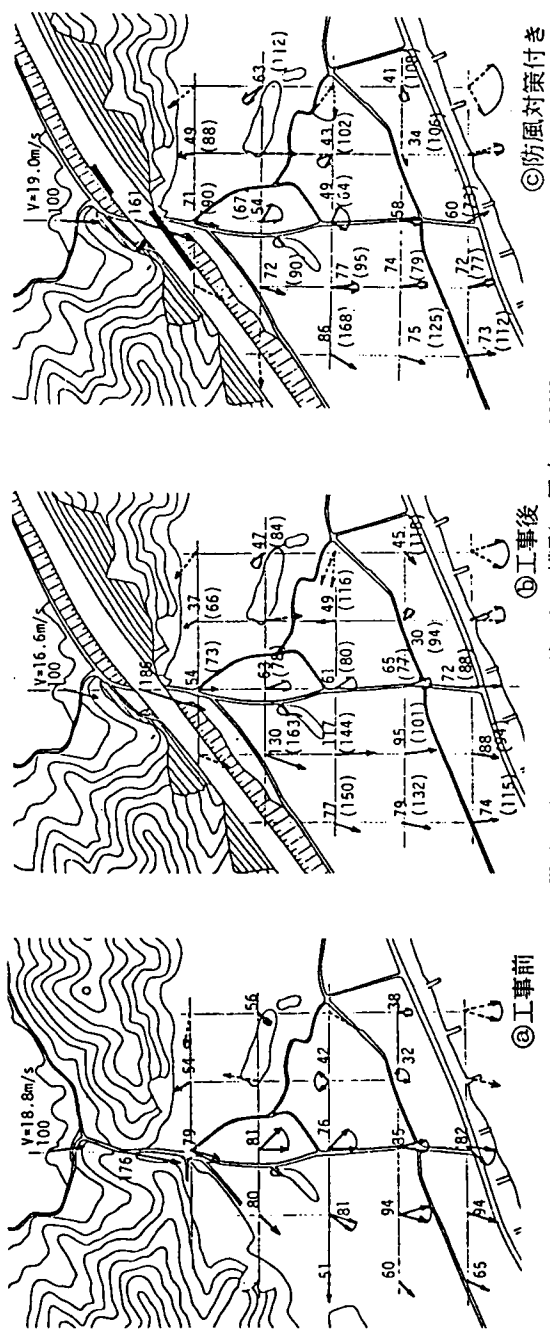


図 7-46 風速ベクトル : ひずまない模型 : 風向 NW

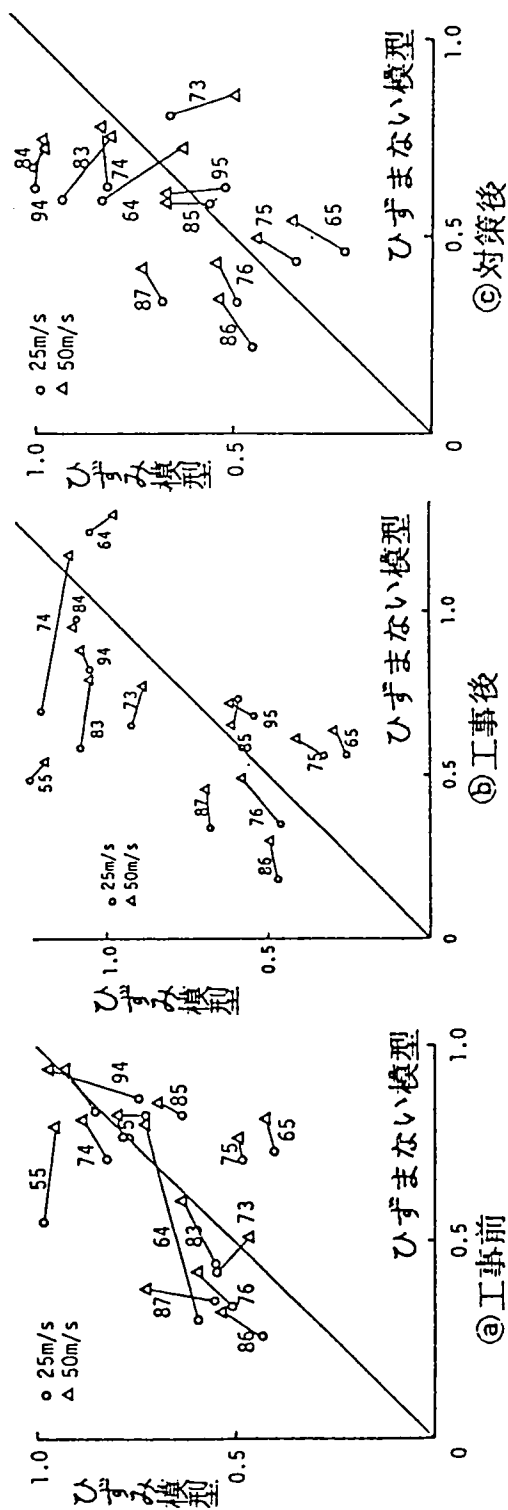
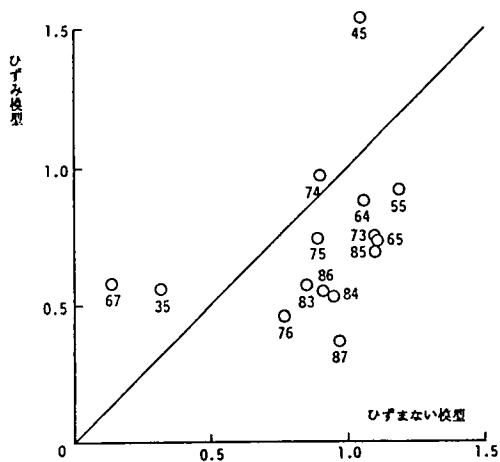
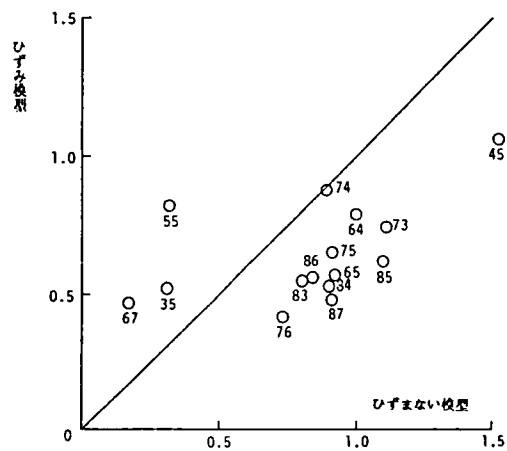


図 7-47 両模型間の風速の対応, NW

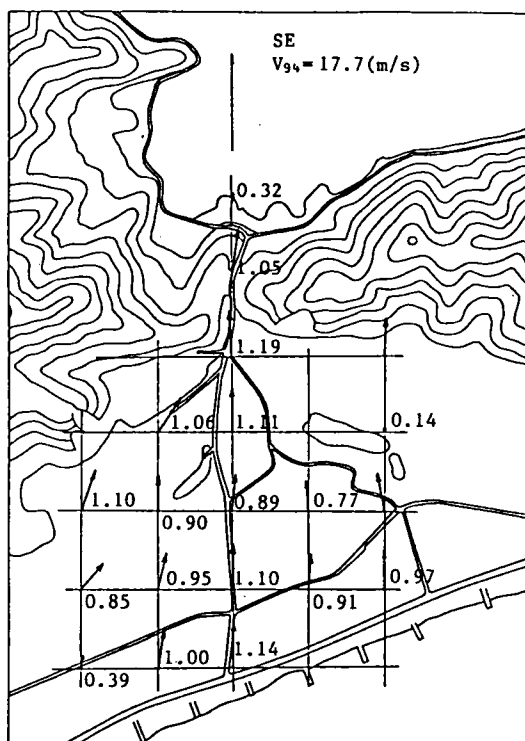


㊤工事前

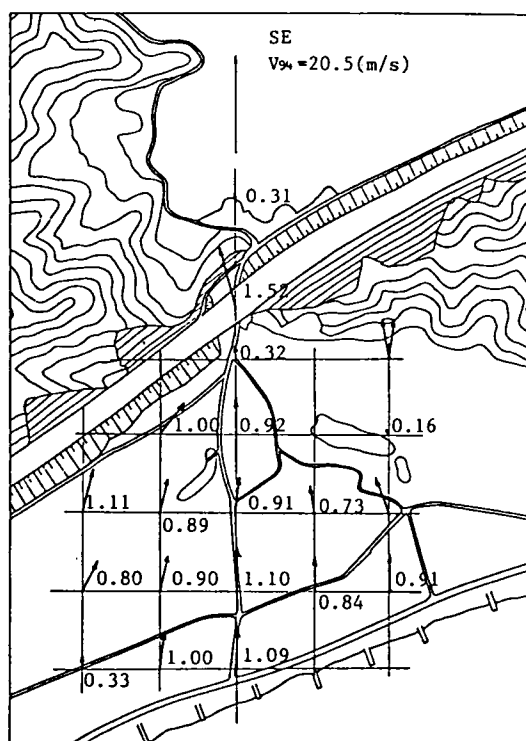


㊦工事後

図7-48 両模型間の対応 風向 SE



㊤工事前



㊦工事後

図7-49 風速ベクトル : ひずまない模型 : 風向 SE

7-4-2 上流側地形（模型化範囲）の風況特性に及ぼす影響

地形模型実験の実施に際して、模型化範囲と縮尺の決定方法が重要な問題となることは序論において述べたとおりである。特に、対象地域の上流側の地形をどこまで再現するかという問題は、対象地域の正確な風況特性を把握するうえで重要となる。

ここでは、7-3-2に示した切通しを有する地形模型において、北西周辺の他風向と比較して切通し下流側平野部の風況特性が大きく異なる北西から西に15度偏った風向（南側の尾根を越流した気流が支配的となり、切通し下流側平野部の風速が非常に大きく、南側尾根裾部においても尾根と平行な方向に強風が作用する。）に注目し、上流に存在する半島状地形の風況特性に及ぼす影響について検討するものである。

図7-50は、測点35の風速で基準化した切通し周辺部の風速ベクトルを示したものであり、㊸図は、前掲の半島を設置したものであり、㊹図が、半島を取り除いた結果である。

半島を取り除くと、LINE 5の風速値は、ほとんど変化していない（測点35の風速で基準化しない値）が、その他の下流側平野部では大きく減少し、南側尾根裾部の尾根と平行な方向に作用していた強風は、ほぼ半減し、平野部の風向分布特性も大きく変化し、北西の風向時の分布に類似しており、上流側の半島の切通し周辺の風況特性に及ぼす影響が非常に大きいことが明らかである。

切通し周辺の風況特性に及ぼす上流側の半島の影響を詳細に検討するために、図7-51に示す新たな測点を設定し、半島の有無及び半島のための3種類のケースについて風向風速の調査を行なった。

図7-52は、各状態における地上15mの風速ベクトル（境界層外風速（5m/s）で基準化したもの）を示したものである。また、図7-53、54は、それぞれ、半島下流部の横断面及び、縦断面の風速分布を示したものであり、これらの図より、上流側半島の有無による切通し下流側平野部の風況特性の相違が説明できる。

まず、半島直背後の風況特性は、当然大きく異なり、特に、半島付きの場合には半島と切通し南側野山裾間（測点5E、6E付近）で、半島のみ設置した場合と同様に、半島自身の後流に流入する流れが生じ、下流側の山の影響もあって、半島の場合より風速が強くなっている。また、LINE 8上における南側尾根の風向風速も、半島を取り除いた場合には切通し周辺に気流が収束し、南側尾根を緩やかに迂回しながら越流している様子が見られるが、半島を取付けた場合には、南側の山の斜面に沿う強風が測点8D、8C'付近において観測され、その作用方向は横断面図より明らかなように半島自身の後流域方向（下流側の

地形を取り除いた場合と比較するとやや北側に移動しているが、その存在は明瞭に確認できる。) 、すなわち、北側尾根背後の平野部方向となり、半島の直背後における両者の差が大きく影響していることが伺える。 また、測点8D' (南側尾根の稜線の下流側測点) においては、半島を取り除いた場合には剥離流線の内側に位置し弱風となっているが、半島を付与した場合には、南側山裾方向に強風が作用している。 この現象は、上流側の半島からの剥離流線が地表に接近することによる影響と考えられる。(縦断図参照) このような切通し上流側の風況変化が、尾根からの剥離形態の差として表われ、切通し下流側平野部の風況特性の変化 (LINE 9等) を導いていることが明らかである。

ここでは、対象地点の上流側の半島状地形の及ぼす効果に関する調査結果を示したが、風洞実験における模型化範囲の決定方法に言及するためには、上流側地形の及ぼす効果の一般性を抽出することが肝要であり、さらにデータの収集を行なう必要がある。

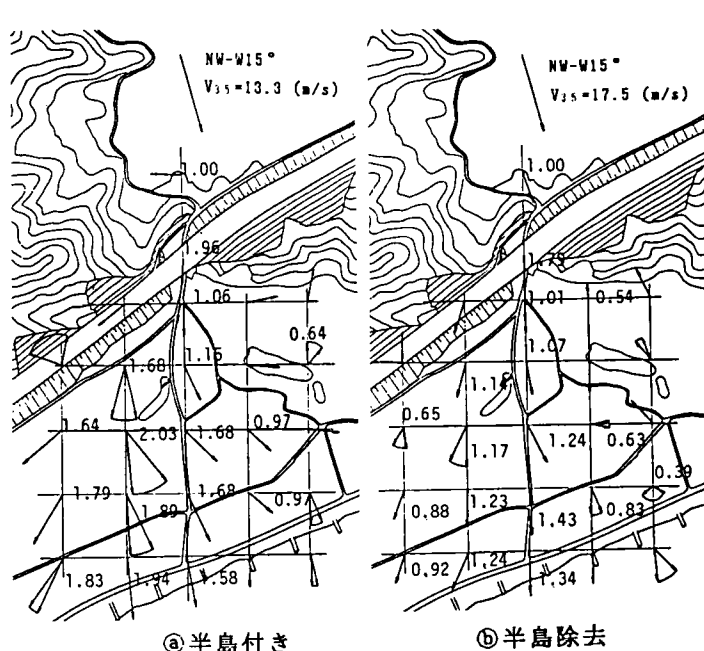


図7-50 上流側半島の平野部風速に及ぼす影響
(工事後, NW15W)

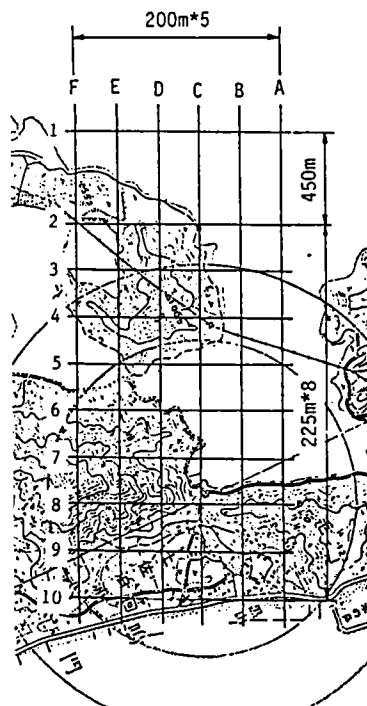
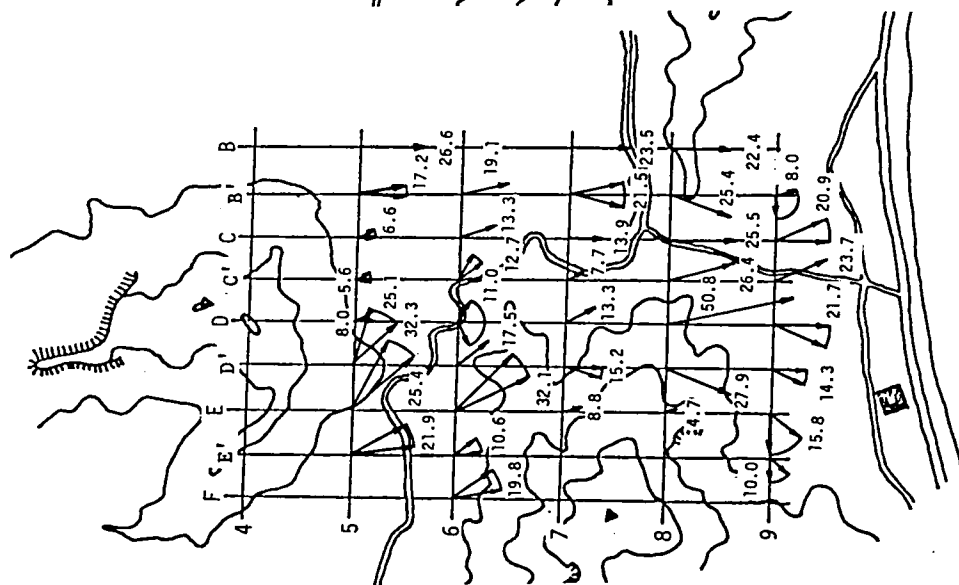
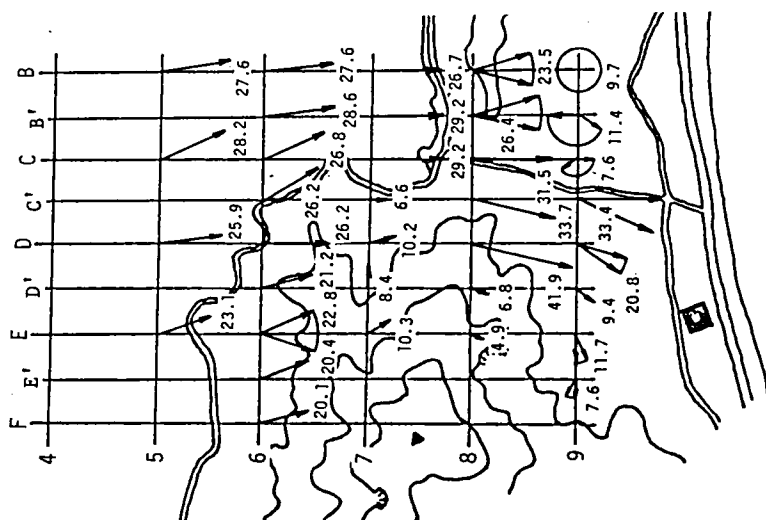


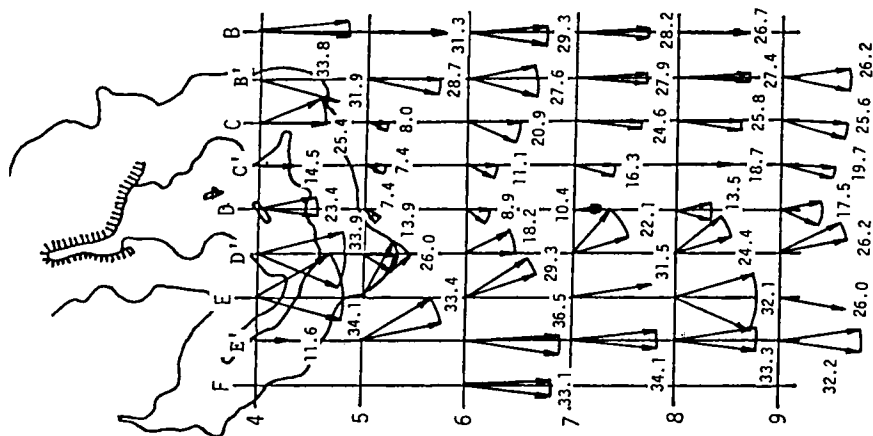
図7-51 計測点



㊐ 半島付き



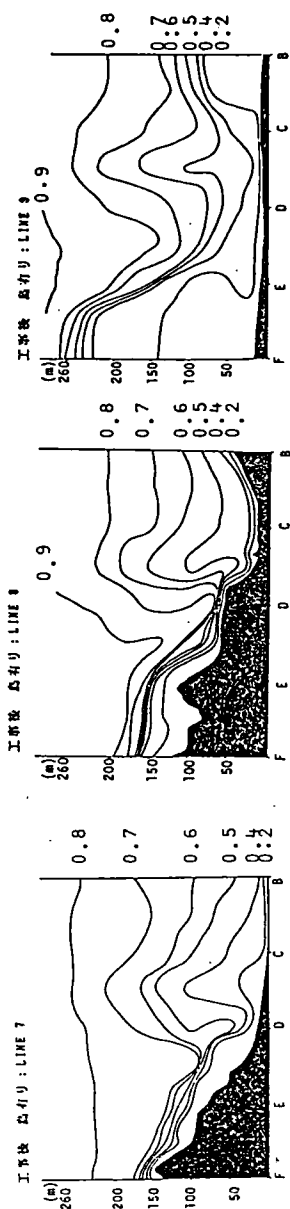
㊑ 半島除去



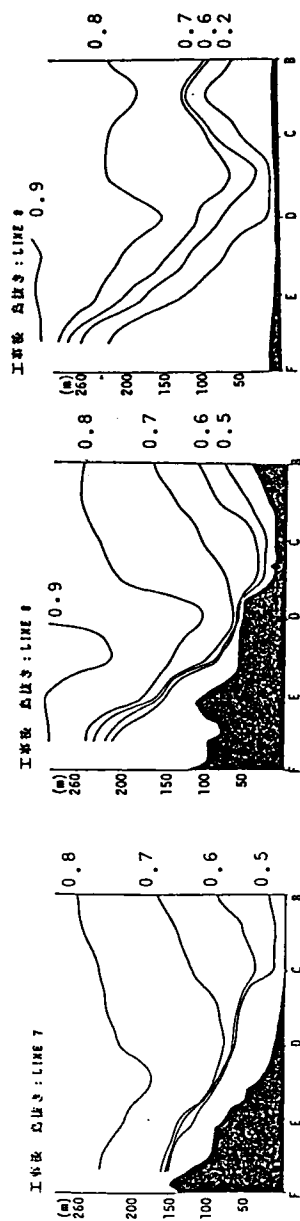
㊒ 半島のみ

図7-52 風速ベクトル (NW15W, 地上15m)

(a) 半島付き



(b) 半島除去



(c) 半島のみ

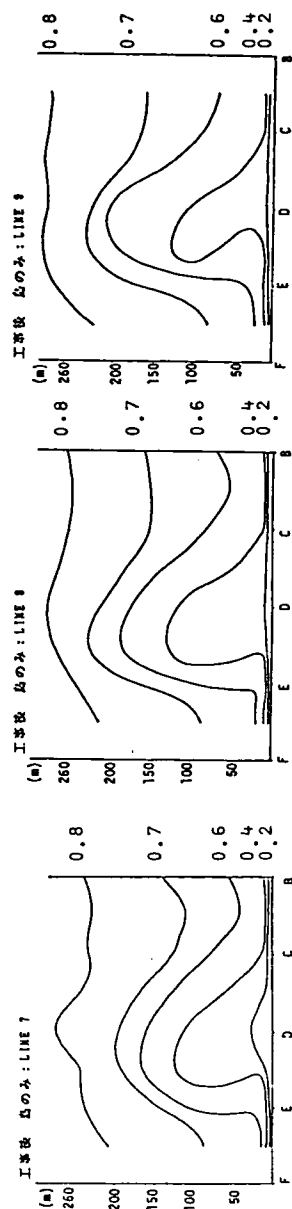
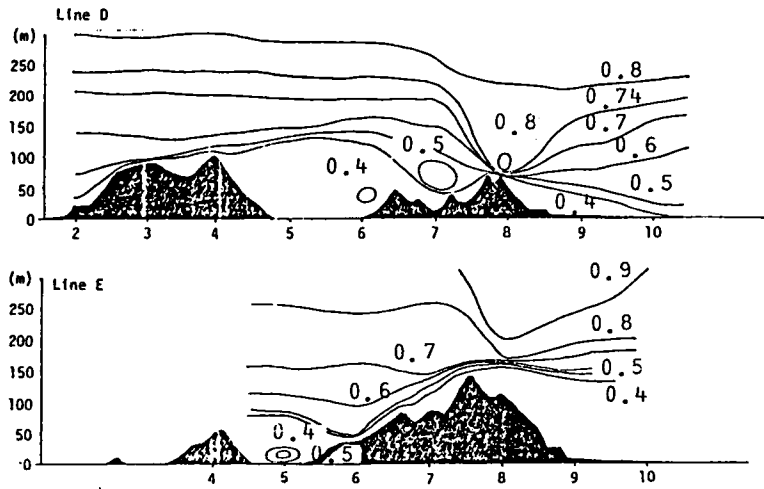
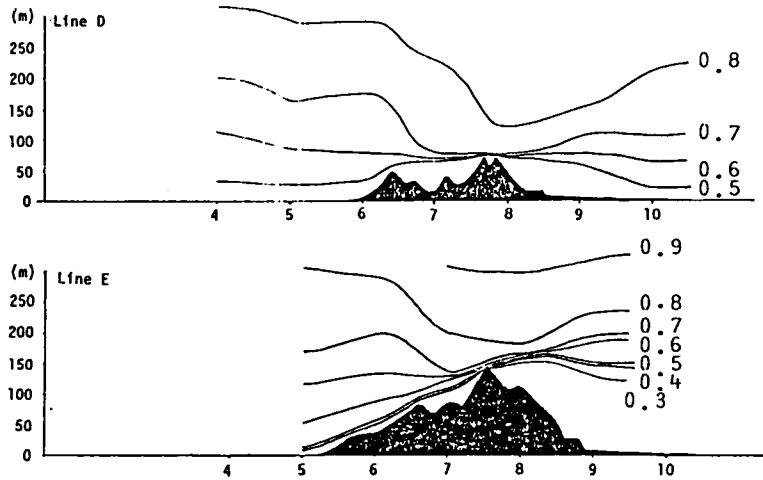


図7-53 横断面風速分布 U/U_0

㊤ 半島付き



㊦ 半島除去



㊧ 半島のみ

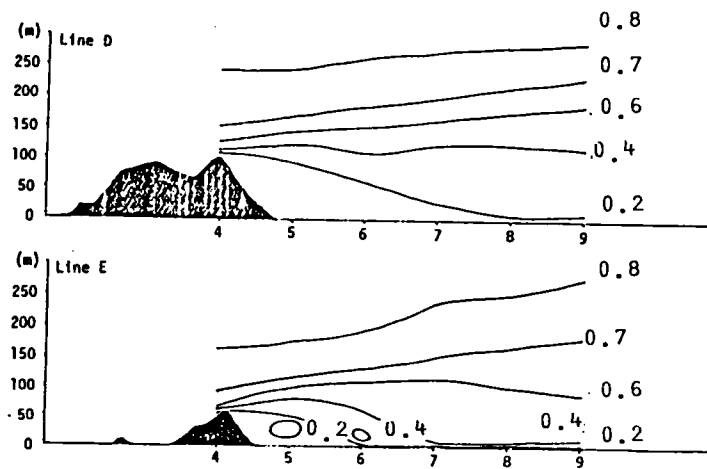


図 7-54 縦断面風速分布 U/U_0

7-4-3 境界層乱流特性及び実験風速の風況特性に及ぼす影響

対象地域に作用する接近流速の境界層乱流特性は、各種の地形における風況特性に影響を及ぼすことが予想できるが、具体的な検討はほとんどなされておらず、ESDU等の風速評価式中においても地表粗度による平均風速の変化は考慮されている^{7-13、7-14}が、地形影響係数（地形特性による風速の増速・低減を表わす係数）は、地表粗度の効果と独立に取扱われている。しかし、Pearseらによる三角形の丘における増速効果に関する調査によると、上流側の地表粗度が大きいことに対応するべき指数 α の大きい値では、丘における増速率は増加し、境界層厚さが低くなると、逆に、増速率が低下することを報告している⁷⁻¹⁵。このような境界層乱流特性の各種地形周辺の風況特性に及ぼす効果を把握することは、より合理的な風速の推定に関連して重要となる。また、実験風速（すなわち、Re数）の影響は、丸みのある物体においては、剥離現象に大きな影響を及ぼすことが知られており、この点に関しても未だ明確な基準が作成されておらず解明すべき問題の一つである。

ここでは、スパイヤとラフネスブロックを用いて、平均風速の鉛直分布を示すべき指数 α が0.13、0.3、0.4となる3種類の境界層乱流を作成し（2-3節参照）、切通し下流側の風況特性を調査した。また、風洞設置風速の影響についても調査した。

図7-55は、 $\alpha=0.13$ 及び0.4における北西の風向時の工事前の地上5mの風速分布と工事後における工事前の風速に対する増速率（ U （工事後）/ U （工事前））を示したものである。

工事前の風速分布より、 α が大きくなると、南側平野部において尾根からの剥離域に属する弱風域が尾根に接近し、乱れの大きい接近流中（ α が大）では、尾根からの剥離現象が抑制されていることが明らかである。また、 α の大きいケースにおいて、内海における風速値は当然小さくなるが、切通し周辺部の風速は両者にほとんど差がなく、 α の大きい気流中における切通し周辺部の増速率（接近流速に対する値）が大きくなっており、Pearseらの丘状地形における実験結果と同様の現象が生じている。

工事後においては、 α が大きい場合に増速される領域が若干広がっているが、増速率に関してはほとんど差が生じていない。従って、工事前後のように、相対的な比較を行なう場合には、境界層乱流特性の及ぼす効果は、相殺されるが、個々の状態における風況特性には、剥離現象等に影響が生じ異なる風況特性を導くことが明らかである。

また、風洞風速（Re数）の及ぼす効果について調査した結果を図7-56に示す。風向

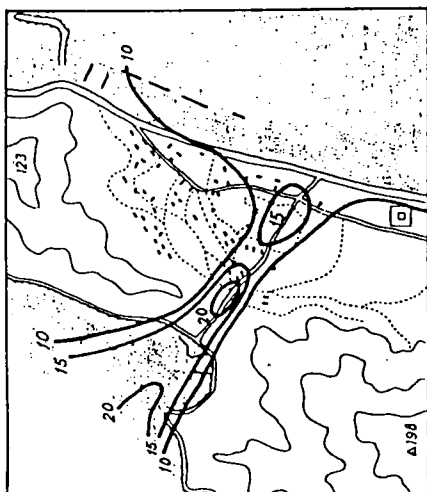
は、北西から10度西に偏った状態であり、㊸図には、工事前の結果を、㊹図は、工事後に対する結果であり、㊺図に、防風対策を施した状態における実験結果を示したものであり各観測値は、風洞設定風速（境界層外の風速）を用いて基準化されている。

なお、測定高さは、地上5mであり、各実験風速におけるRe数は、南側の山の頂上を代表長さとして用いると、それぞれ、 1.9×10^4 、 3.9×10^4 、 6.3×10^4 となる。

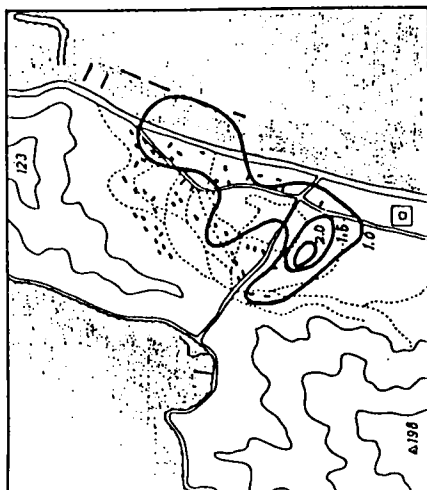
測点番号は、前出の図7－35に示された地点であり、工事前においては、各実験風速における差は、測点A6を除いてほとんど実験誤差以内と考えられる。この測点A6は、切通し中心部に相当し、工事前の状態は、比較的丸やかな地形であり、切通し部に収束する風況特性が実験風速の差によって若干異なっていることが予想される。

工事後の状態では、切土によって、切通し周辺の地形はかなり角ばっており、工事前に見られた、設定風速の差に基づく収束効果の差は生じず、全測点でほぼ同一の風速値を示している。

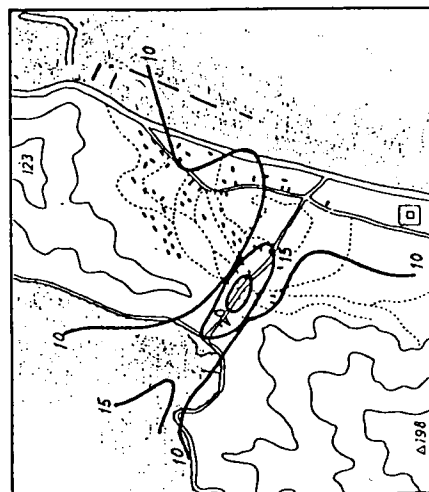
防風フェンスを設置した状態では、強風の作用する南側平野部測点（E、F）における風速分布には差がないものの、家の背後の測点（B3）或は、北側の尾根の逆流域の測点（B6）において、大きいRe数の実験結果が過小評価となっており、透過性フェンスを通過する流れが、Re数によって変化している可能性もあり、さらにこの点について検討を加える必要があろう。



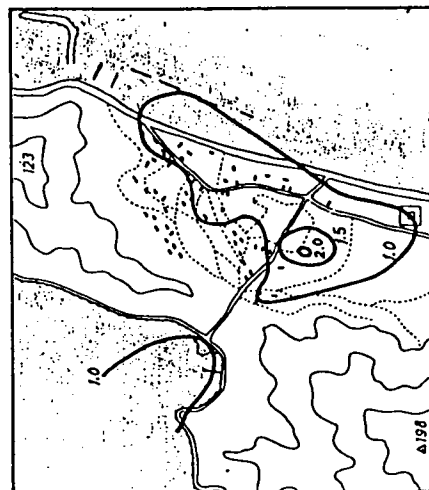
$U_1 : \alpha = 0.13$



$U_2/U_1 : \alpha = 0.13$



$U_1 : \alpha = 0.4$



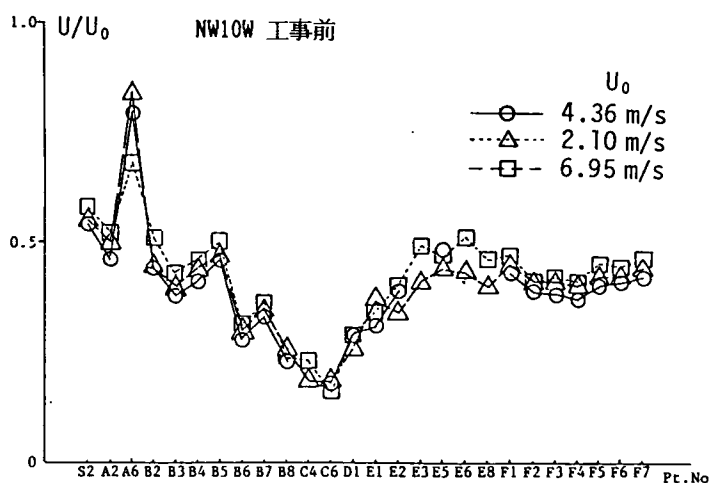
$U_2/U_1 : \alpha = 0.4$

㊶ 工事前風速分布

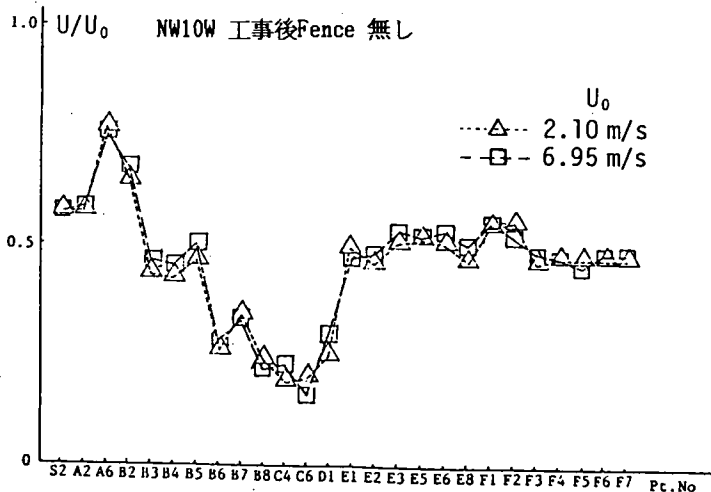
㊷ 工事前に対する工事後の増速率

図 7-55 べき指数 α の平野部風速分布に及ぼす影響

㊤ 工事前



㊦ 工事後



㊧ 防風対策付き

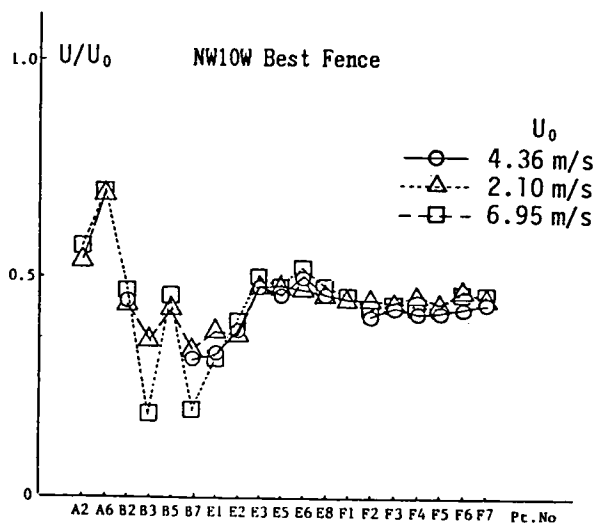


図 7-56 風向NW10W における実験風速の平野部風速分布に及ぼす影響

7-5 結言

本章においては、谷状地形及び切通し状地形における増速効果について、各地形を単純化した簡略地形模型を用いて調査し、一般的な地形への適応性について、縮尺地形模型を用いて検討した。本章で得られた結果を以下に要約する。

- ①台地状地形の中央部に設置された水平かつ平行な谷状地形においては、谷の深さ H が一定となる谷状地形開始点付近の増速率が最大となり、谷底からの高さ z/H の小さい谷底において増速率が大きくなる。また、谷幅 W/H 、及び、谷の上流側斜面勾配 ψ の増速率に及ぼす効果は類似しており、 W/H の減少または、 ψ の増加によって、増速率は大きくなるが、増速される領域が狭まることが明かとなり、この現象は、 z/H の増加時の特性とも一致している。さらに、谷の長さ L/H の風況特性に及ぼす効果として、 L/H の減少に伴ない増速率が増加することが挙げられる。
- ②切通しに直交する風向時における切通し周辺部の風況特性は、谷状地形における風況特性と類似しており、開口幅 W/H 、上下流法面勾配 ψ の風況特性に及ぼす効果が大きく、開口部の斜面勾配 θ は、尾根の背後に巻込む気流に影響を及ぼし、影響範囲は、開口部斜面の後流域に限定される。また、底面を同一寸法とし、尾根の高さ H を変化させたひずみ模型では、切通し部に流入する流量並びに尾根からの剥離の強さ等が異なり、増速率、増速される領域にも差が生じ、ひずみ模型は、定性的な風況の把握には有効であるが、定量的な調査には問題があることが明かとなった。
- ③縮尺地形模型を用いた複雑な谷及び切通し状地形における風況特性の調査から、定性的ではあるが、単純化された地形模型によって得られた風況特性と同一現象が生じていることが確認できた。定量的な増速効果の把握には、単純化地形模型を用いて、地形因子の及ぼす影響をさらに詳細に調査し、複雑に各地形因子が組み込まれた場合の増速効果を把握する必要がある。
- ④また、現地観測結果と模型実験結果は、作用する風向が一致する場合には、良い対応関係が得られ、模型実験の妥当性が確認できた。そして、縮尺地形模型を用いた風洞実験において、考慮すべき要因である模型化範囲、境界層乱流、実験風速についても若干の検討を加えたが、防風フェンスの透過性に関する相似性、及び、風向によって、上流側地形の対象地域に及ぼす影響が異なる現象も存在しており残された問題も多く、さらに実験データを蓄積する必要がある。

第8章 半島状地形における風況特性

8-1 概説

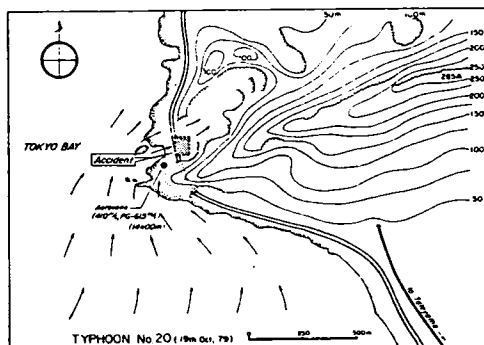
前章までに、丘、谷、及び切通し状地形周辺部における局所地形の風況特性に及ぼす影響（特に、増速効果）について検討を加えてきたが、本章においては、切通し状地形の片側に相当する岬状の地形周辺部の増速効果について調査するものである。

岬状地形における増速効果として、相馬は、千葉県の明鐘岬における自動車横転事故の調査から図8-1に示すように、風向の変化に伴って、岬周辺の風況が変化し、岬の後流に位置していた弱風域に、岬を迂回する収束風が作用したために、海上等の周辺部の風速の約2倍の強風が観測されたことを報告し、地形性突風として注目している。⁸⁻¹⁾

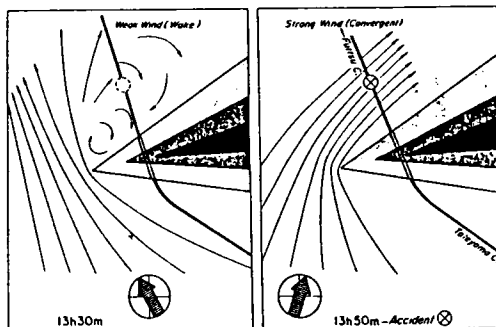
また、宇都宮・長尾らは、台形断面の半島状地形模型を用いた風洞実験より、作用する風向及び断面形状によって、半島後流部の風況特性が大きく異なり、岬の断面形状と風向が、風況特性を支配することを報告している。⁸⁻²⁾

さらに、Cook, Coulson, McKay⁸⁻³⁾は、ジブラルタル空港周辺（急斜面の半島状地形、Rock）における斜面のコンクリート擁壁の飛散原因を調査した縮尺地形模型実験及びパイロットへのアンケート調査等によって、特定の風向（尾根の軸と10～50度偏った風向）においては、尾根の下流側に、回転渦（図8-2）が形成され、強風が作用することを明らかにしている。

本研究は、これらの研究をさらに発展させ、岬の断面形状並びに作用する風向の及ぼす影響をより詳細に調査しようとするものであり、半島を簡略化した単純地形模型実験により、強風の発生機構を明らかにし、半島状地形周辺の強風を支配する主たる地形因子の抽出を試みるものである。また、このような極めて局所的な地形性強風の一例として、前章に示した切通し状地形として注目した2つの尾根に囲まれた小平野部において、尾根直背後の小領域のみ（図8-3㉔中斜線を設置した領域）に作用する“しもにし”とよばれる強風（偶然、現地観測の予備調査を行なった時（昭和63年2月3日）しもにしの風が作用しており、風向分布のみ調査した結果を図8-3㉕に示す。太実線で示した尾根の直背後の地点において尾根方向に強風が作用し、他の平野部では弱風となっていた。）に着目し、この強風現象が、本研究で注目している半島状地形の強風と類似性を有することを明らかにすると共に、鷺羽山周辺における半島状地形を対象とした縮尺地形模型実験により、一般的な半島状地形における増速効果についても考察を加えるものである。



明鐘岬周辺の地形図と南風の場合における推定気流



明鐘隧道北側での風速変化の模式図。左図：一般風向雨東のため事故地点では風が弱い。右図：一般風向が南々西になると猛烈な風が事故地点に吹き込む。

図8-1 明鐘隧道周辺部の風向推定図⁸⁻¹⁾

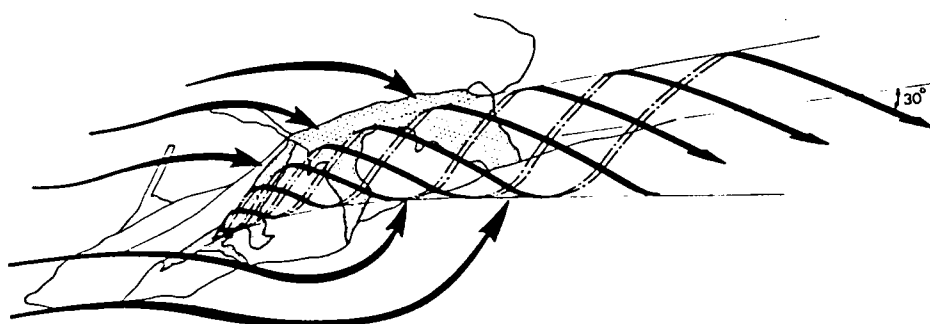
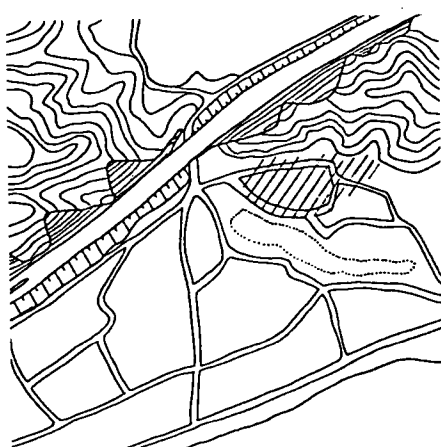
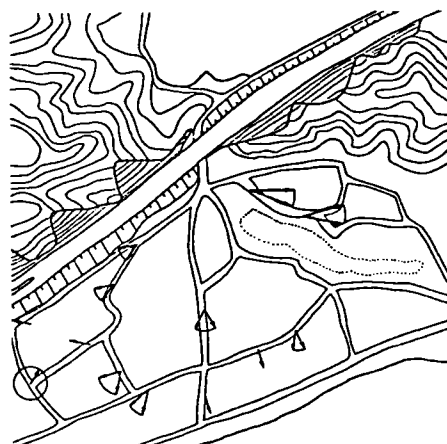


図8-2 ジブラルタルにおける流れの概略⁸⁻³⁾



① “しもにし”の作用地域概略 (斜線部)



② 1988年2月3日現地風向観測結果

図8-3 “しもにし”の概要

8-2 単純化半島状地形周辺の風況特性

半島状の地形の風況特性に及ぼす影響をより詳細に検討するために、図8-4に示すような台形模型を用い、表8-1に示すように、半島の先端部勾配 θ 、尾根の上、下流側法面勾配(Ψ_F 、 Ψ_R)をパラメータとして強風を支配する地形因子の抽出を行なった。

また風向(β)の強風特性に及ぼす影響についても調査した。なお、スパイヤとラフネスブロックによって風洞内に作成した乱流境界層の特性は、2-3節に示されており、平均風速の鉛直分布を示す”べき指数 α ”は、約0.13と若干小さめである。

図8-5は、水平偏角 $\beta=22.5^\circ$ 、法面勾配 $\Psi_F=\Psi_R=55^\circ$ 、先端部勾配 $\theta=40^\circ$ の半島状模型の下流側の水平平面における風速分布を各測定高さと同一高さの接近流速を用いて基準化($U(z)/U(z)$)表示した増速率であり、④図には、風向分布も併せて示している。

また、図8-6には、図8-5と同一模型における尾根と平行な平面(Y-Z面)における境界層外風速で無次元化された風速(U/U_0)の等値線を、さらに、図8-7には、尾根と直交する平面(X-Z面)における無次元化風速(U/U_0)の等値線を示した。これらの風向風速分布から、半島状地形における風況特性を以下に簡単に列挙する。

- ①地表面付近($z/H=0.07\sim 0.1$)において、模型先端から、尾根方向(Y方向)に2~4H尾根と直交方向(X方向)に0.2~1H程度の領域は、同一高さの接近風速と比較すると8割以上増速され、境界層外風速より若干大きい風速となっている。そして、増速される領域は、接近風の作用方向と尾根筋の走行方向をほぼ2等分する方向に広がっている。増速されている地点における強風は、接近風速の方向と大きく異なり、尾根背後に回り込む方向に作用している。
- ②尾根の中腹の高さでは、尾根の先端部付近において尾根を越流する強風が観測されているが、地表面付近で見られた尾根背後の強風域は、この高さでは弱風域となる。
- ③尾根と同程度の高さ($z/H=1\sim 1.4$)では、地表面付近の強風域の上空において増速現象が生じている。また、全ての高さにおいてY方向に10H以上先端から離れると、風速は減少し2次元丘背後の流れに近づいている。
- ④地表面付近の風向分布、尾根と平行及び垂直な断面の風速分布から、尾根先端部から剥離した流線の内側において渦巻きを形成する流れが見られ、 x の増加と共に渦の開始点が半島先端部から遠くなり、 y の増加に伴って、渦の中心が尾根筋から遠ざかっている。また、両方向ともに、原点から遠ざかるに従って、渦の高さ方向への拡がりも大きくなっている。

また、図8-8は、 $z/H=0.07$ における乱れの強さの分布を示したものである。接近流速と比較して6割以上増速されている領域においても乱れの強さは接近流の値と同程度（15-20%）であり、非常に乱れた気流が作用していることが明らかである。

以上の流れの特性を総合すると、尾根の高さが一様となっている部分も含めた先端部周辺から尾根の背後に気流が巻き込み、渦を形成し、その渦が、接近風の作用方向と尾根の成す角をほぼ2等分する方向に流下する。この現象は、ドライアイスによる可視化実験によっても確認できている。そして、渦の回転半径が小さく、気流が著しく収束する地表面付近で非常に大きな風速となり、その作用方向は渦の回転方向に一致していることが明らかである。なお、この現象は、前出のCook、Coulson、Mckayによって調査されたジブラルタル空港周辺（急斜面の半島状地形、Rock）における斜面上のコンクリート擁壁の飛散現象と同一であると考えられ、さらに、相馬によって報告されている千葉県の上総岬における自動車横転事故も、類似した気流特性に起因しているものと考えられる。また、半島の背後に生じる旋回渦は、図8-9^{a-d})に示した緩やかな傾斜の屋根上に発達する旋回渦に類似していると判断できる。

このような流れに及ぼす風向の影響を調査した結果を図8-10に示す。風速測定高さは、増速効果の最も大きい $z/H=0.066$ であり、模型形状は前図と同一である。風向分布は、尾根の先端部から剥離した領域では、全ての風向（尾根に平行に風が作用する場合は風向分布の調査を行っていない。）において尾根背後に巻き込む流れが観察できるが、気流が尾根と垂直に作用する場合には、半島の先端部において増速しているものの他風向と異なる風速分布を示し、尾根背後の低圧域に先端部周辺から気流が巻き込み、渦巻きながら流下し、地表面付近が増速される流れのパターンは形成されていないと考えられる。また、尾根とほぼ平行に風が作用する $\beta=67.5^\circ$ がこのような流れの生じる最大角と考えられる。図8-10の等風速線から求めた各風向における最大増速率は、図8-11に示すように、水平偏角 β の増加と共に増加し、 β が約 40° 付近において最大値 $(U(z)/U_\infty(z)=2.1)$ となり、その後、 β の増加に伴って減少している。そして、この最大増速率の生じる地点（図8-12）は、 β の増加と共に、尾根背面に接近し、尾根先端部から遠ざかっている。また、増速される領域は、水平偏角 β の増加と共に広がり、最大増速率と同様に、ある風向を境として、その後減少すると考えられるが、測定点が少なく断言はできない。

表8-1 単純化模型概略

水平偏角 β	$-45^\circ, -22.5^\circ, 0^\circ, 11.3^\circ, 22.5^\circ, 33.8^\circ, 45^\circ, 56.3^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$
模型高さ H	3cm, 5cm
先端勾配 θ	$30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 60^\circ$
上下流法面勾配 ψ_F, ψ_R	$20^\circ, 45^\circ, 55^\circ, 60^\circ, 90^\circ$

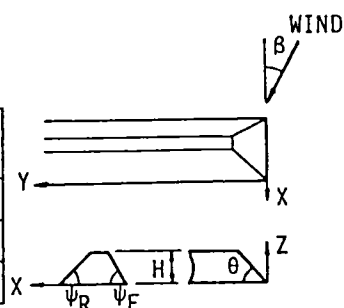


図8-4 単純化模型概略

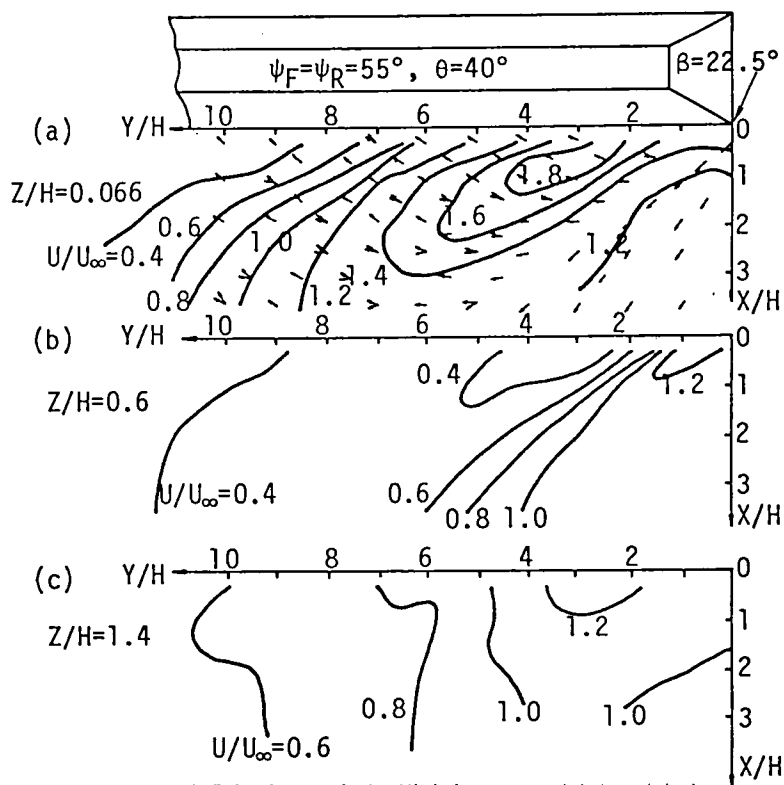


図8-5 風速分布 (X-Y 平面、増速率 $A_z = U(z)/U_\infty(z)$)

$\beta = 22.5^\circ, \psi_F = \psi_R = 55^\circ, \theta = 40^\circ$

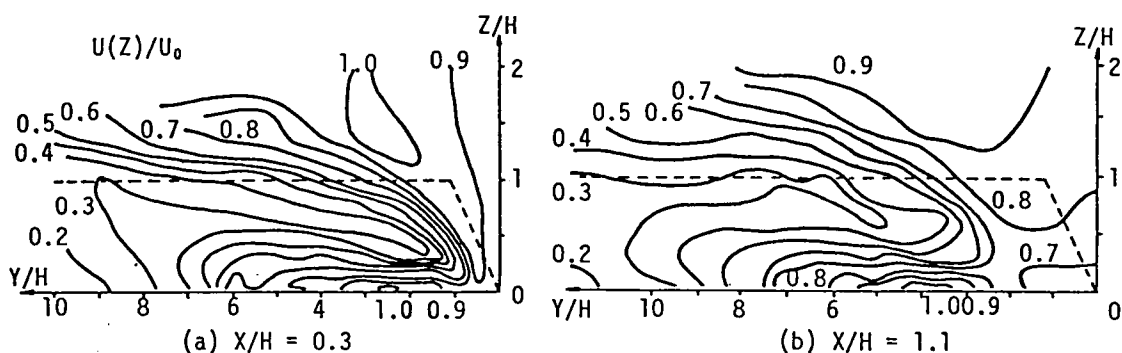


図8-6 風速分布 (Y-Z 平面、 $U(z)/U_0$)

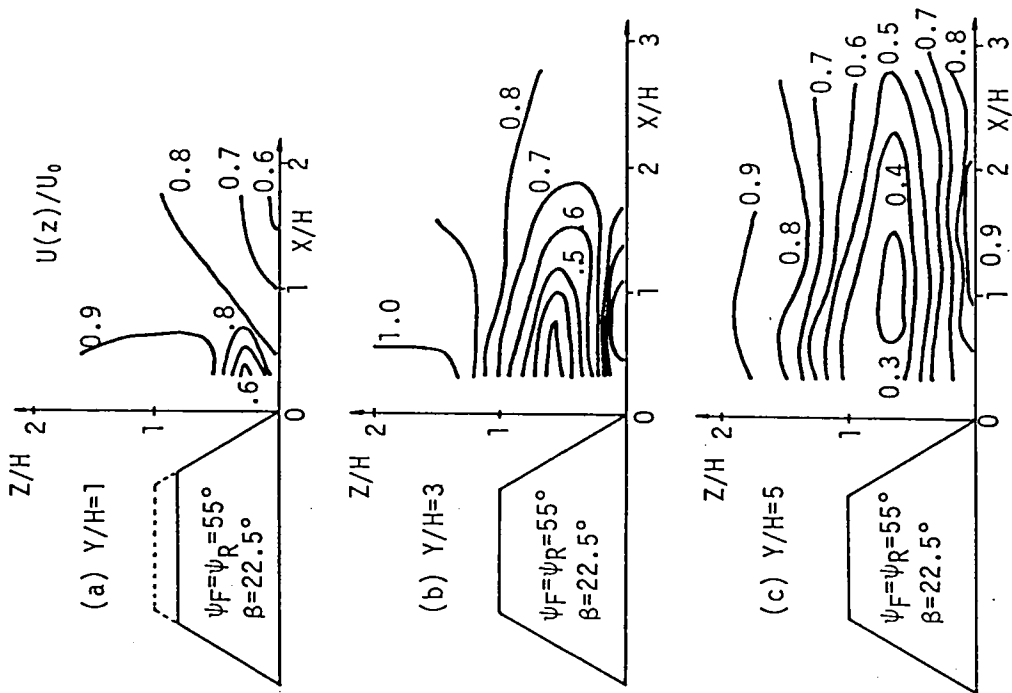


図8-7 風速分布 (X-Z 平面、 $U(z)/U_0$)

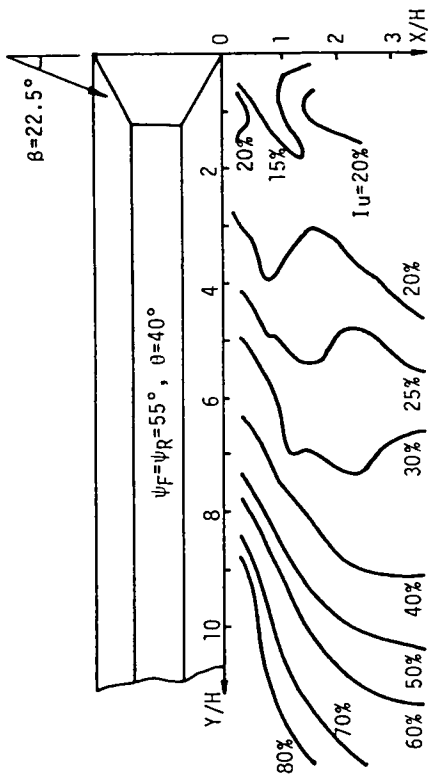


図8-8 乱れの強さの分布 (X-Y 平面、 $z/H=0.066$)

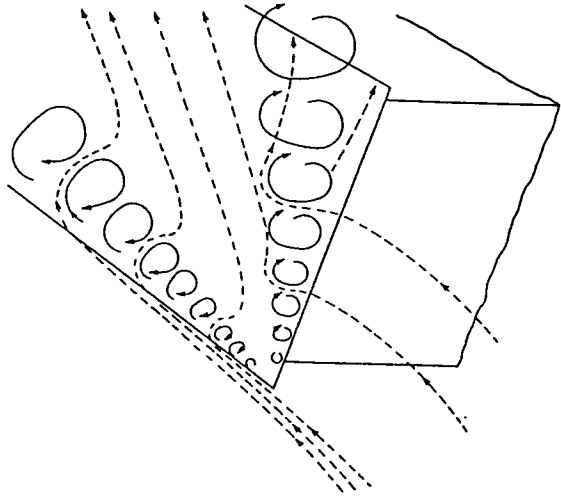
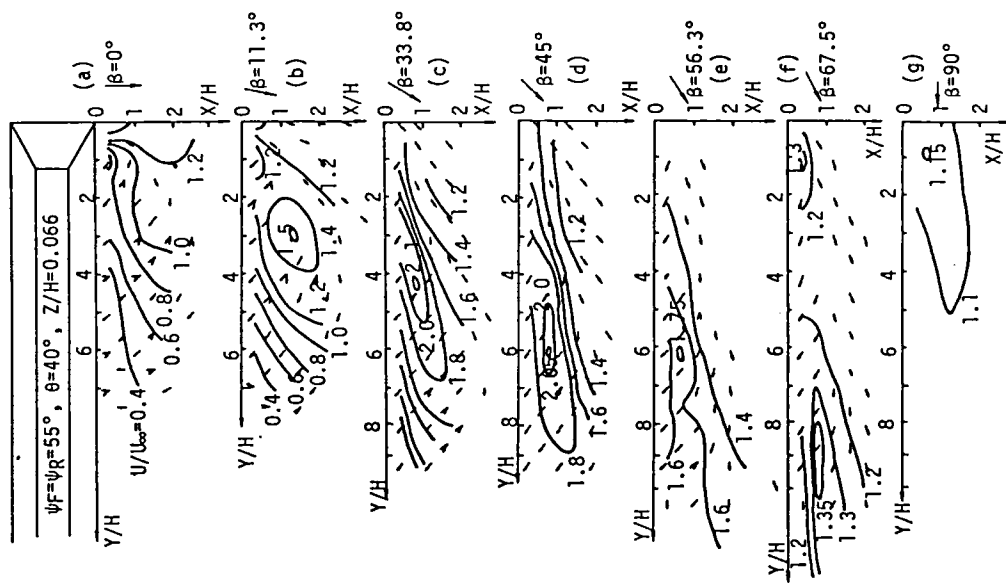


図8-9 緩勾配の屋根に生じる旋回渦⁸⁻⁴⁾



次に、半島状模型断面形の風況特性に及ぼす影響の調査結果の一例を図8-13に示す。

④～⑥図は、下流側法面勾配 Ψ_R のみを変化させた実験結果の一例であるが、 Ψ_R の増加に従って、最大風速値が増加し、その出現点が半島先端部に近づいている。上流側法面勾配 Ψ_F の効果は、④、⑥図を比較すると明らかなように、 Ψ_F の増加に伴って、最大風速は増加するが、最大風速の生じる地点は変化しない。また、半島先端部の勾配 θ の減少は Ψ_F の増加とほぼ同様な影響を及ぼすことが⑤、⑦、⑥図の比較から明らかである。そして、これらの対応関係を断面周囲の流れと対応させて考察する。

まず、法面勾配 Ψ_F 、 Ψ_R は、尾根からの剥離の強さ、すなわち、尾根背後の負圧の大きさに直接関与し、 Ψ_F 、 Ψ_R の増加は、共に、背面圧力の低下を導くことによって風速が増加する。半島先端部勾配 θ は、半島先端部から負圧部に流入する流量に関係し、今回の実験範囲では θ の減少によって流量が増加し風速が増加する。最大風速発生点が、下流側法面勾配 Ψ_R によって支配されるのは、図8-14に示すように法面勾配として、比較的なだらかな $\psi=20^\circ$ を用いた場合、下流側の影響が上流側法面勾配より大きく、接近流の作用する方向と、下流側法面勾配によって尾根背後の圧力分布が定まることが予想されるが、この点についてはさらに詳細に検討する必要がある。また、本研究では、上面の長さが一定の台形模型を用いているが、半島状地形の後流に作用する強風現象は、尾根の剥離域の負圧と密接な関係があることが予想され、この因子についても考慮する必要がある。

なお、このような強風現象は、模型の縮尺を6割とした相似模型及び上層風速を変化（5m/s、2.5m/s）させても同様に生じ、図8-15に示すように尾根の高さHを用いた基準座標表示及び、接近流の風速を用いた無次元化風速表示によると強風域・増速率がほぼ一致することが確認できる。

次に、単独の半島ではなく、前章において注目した2つの尾根の間に切通しが存在する地形に風が尾根に傾斜角を有して作用する場合について検討してみる。

図8-16は、切通しを単純化した模型を用いて風向 $\beta=22.5^\circ$ における調査結果であり風速測定部の模型断面は、図8-13⑥と同一（ $\Psi_F=\Psi_R=60^\circ$ 、 $\theta=45^\circ$ ）であり、風上側の模型は、図8-5等の測定に使用したもの（ $\Psi_F=\Psi_R=55^\circ$ 、 $\theta=40^\circ$ ）である。切通しの幅Wによって最大風速値が変化（切通し幅大程風速が大）し、単独の半島における最大風速値より風速は減少しているが、依然として非常に大きい風速が作用しており、切通しが存在する地形であっても、切通しを形成する尾根の形状並びに風向等の条件を満足すると、単独の半島と類似した強風現象が生じる可能性があることが明らかである。

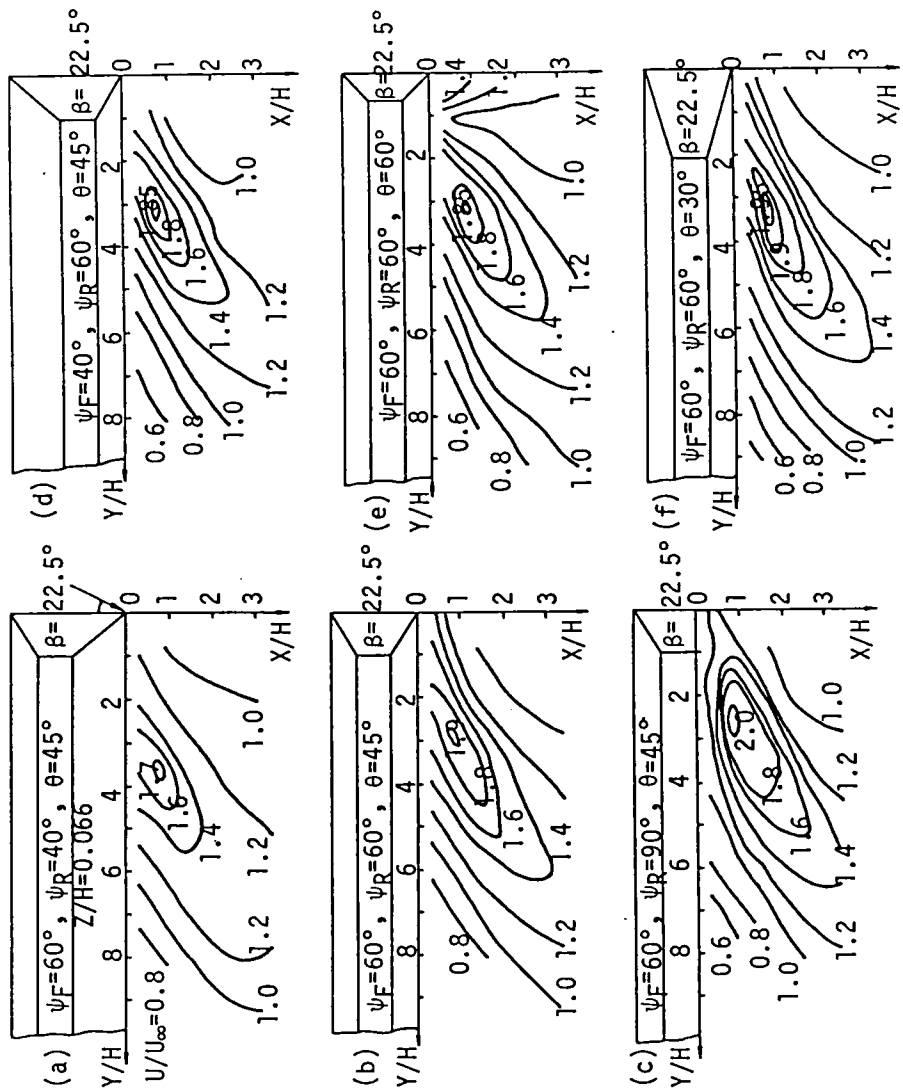


図8-13 断面形状の風速分布に及ぼす効果
(X-Y 平面、増速率 $A_z = U(z)/U_\infty(z)$, $z/H=0.066$)

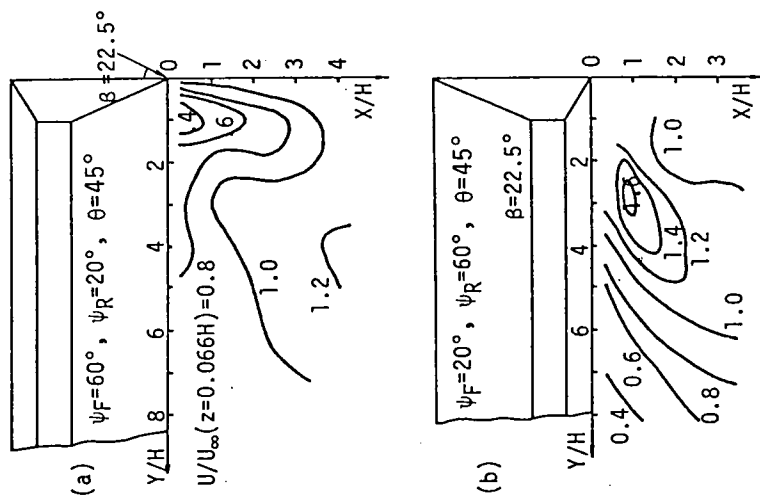


図8-14 断面形状の風速分布に及ぼす効果
(X-Y 平面、増速率 $A_z = U(z)/U_\infty(z)$, $z/H=0.066$)

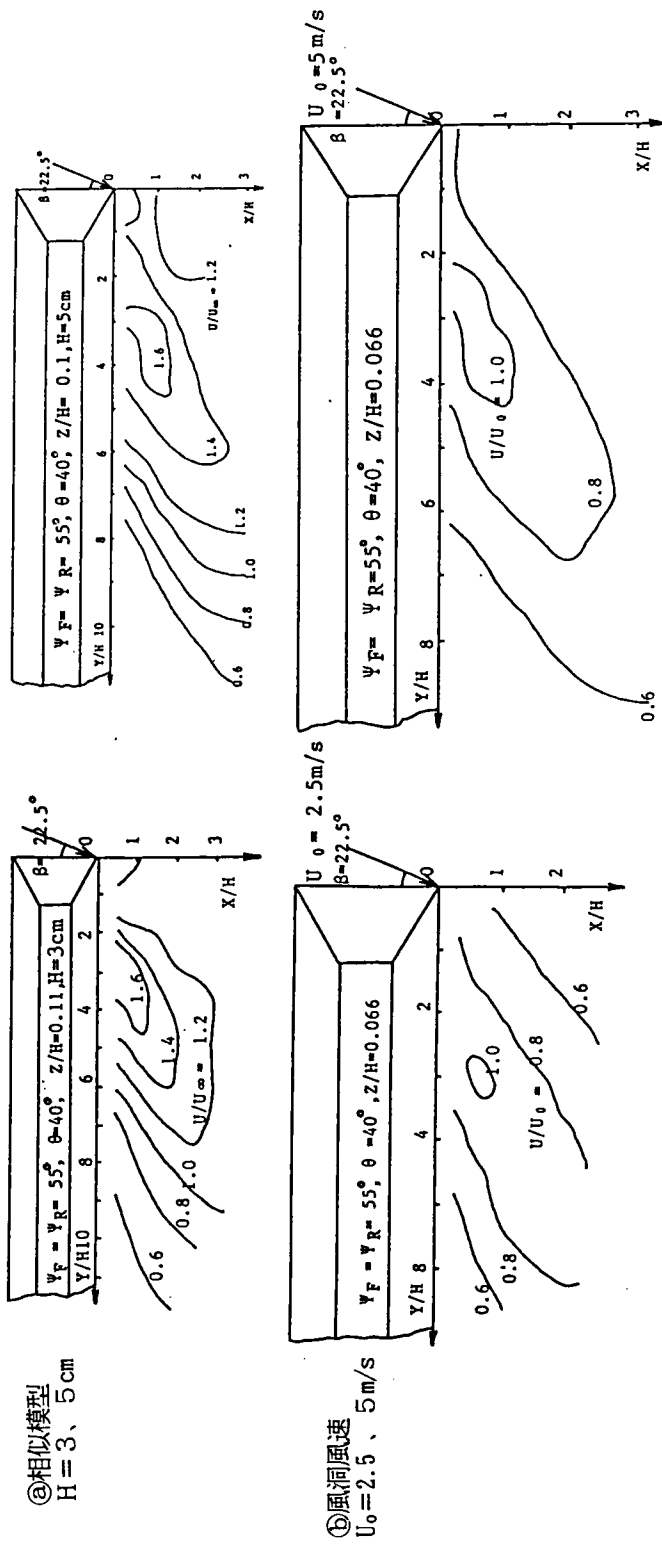


図8-15 相似模型 (a)・風洞風速 (b)の風速分布に及ぼす影響

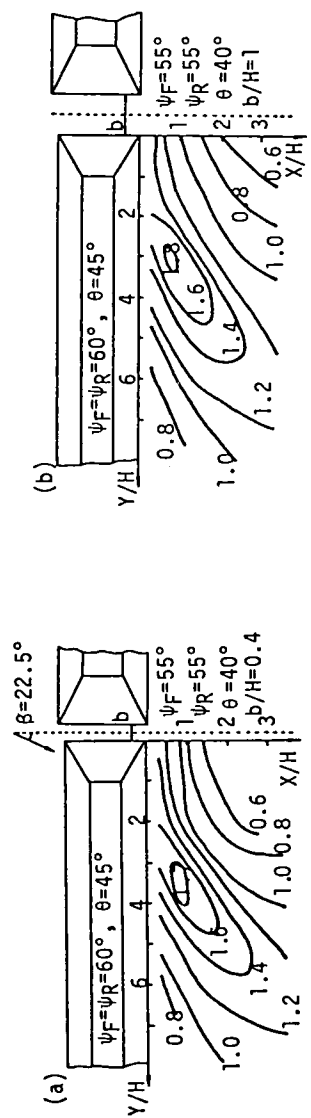


図8-16 単純化切通し模型における風速分布 (z/H=0.066, β=22.5°)

8-3 複雑な半島状地形における風況特性

半島状地形周辺の強風現象は、切通し状地形に気流が傾斜して作用する場合にも類似した特性が生じることが前節で明らかとなり、本節においては、まず、西寄りの風が切通し部に作用するとき”しもにしの風”が発生する図8-3に示した切通し周辺部を対象とし西(W)と、西から13°北に偏った風向(W13N)における縮尺地形模型実験に注目する。

なお、実験に使用した模型・風洞気流は、前章(7-3-2)と同一である。

まず、図8-17に現況(切土工事後に防風フェンスが設置された状態：現地調査を行なった状態)における西風及び西から13°北に偏った風向における平野部の風向分布(地上約5m)を示す。図8-18は、西風における工事前後の地上5mの風速を同一高さの接近流速で無次元化した値(U/U_0)の等値線であり、計測点には●印を付与した。

小旗によって観測された縮尺模型に作用する風向は、図8-3⑥に示した現地の風向分布と非常に良く似た分布となり、風速値も尾根の直背後の地点で非常に強くなり(接近流速の約1.5倍の風速が作用する地点もある。)、縮尺地形模型において、しもにしの風が再現できたものと判断できる。ドライアイスを用いた流れの可視化によると、この風向において強風の作用している領域(通常は、尾根の剥離域に位置し、非常に弱い風速が観測されている。)には、切通し部並びに尾根裾部から気流が回転しながら巻込み、尾根の谷筋に沿って上昇した後に流下していることが確認され、単純化地形模型並びにCookらの調査結果と同一現象であると判断できる。

また、工事前後の風速を比較すると、開口部が広がった工事後において、強風の発生する領域が拡がり、風速値も若干大きくなっている。工事後に増速された領域の風速を工事前の風速値に近づけるための防風対策を試行錯誤的に検討した結果、新たに建設された道路上に高さ10mの透過性防風フェンスを30mに渡って既設のフェンスの北側に設置すると図8-19に示すように風速値の大きな地点の風速が大幅に減少し、工事前と比較して工事後に2倍程度増速された地点(工事前には、収束流が上空を通過することによって弱風となるが、工事後、旋回流が地表面に近づくことに起因して増速される地点)もかなり風速が低減し、最も効果的であることが判明した。なお、このフェンスの高さを6mとすると、風速低減効果はほとんど認められなかった。

また、切通し工事によって地形が変化したことの影響(下流側法面は変わらず、先端部勾配が若干急になるものの、上流側法面勾配がかなり急になり、開口幅も拡がる。)は、前節で得られた単純化地形模型実験結果を用いて、これらの要因を整理すると定性的ではあ

るが、工事後において増速域が広がったことの説明ができる。

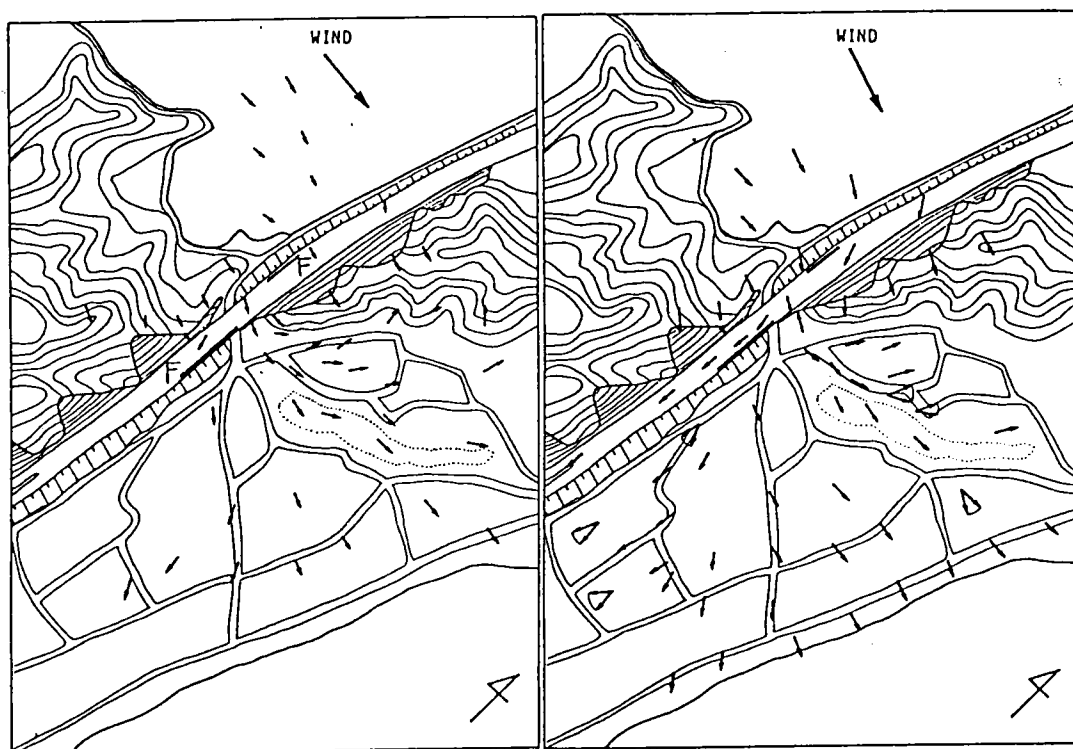
次に、一般的な半島状地形の例として、鷺羽山周辺部の東寄りの風に対する風況特性について調査した結果を示す。なお、使用した模型・境界層乱流特性は、5章（5-3-1①）における下津井瀬戸大橋周辺部の風況特性調査に使用したものと同一である（縮尺 $S=1/3000$ 、べき指数 $\alpha = 1/7$ ）。

図8-20に風向風速計測点を示す。実験風向は、東を中心として、北及び南にそれぞれ22.5度偏った東北東及び東南東であり、東南東の風向では、尾根の走行方向と風の作用方向がほぼ一致し、北に偏るにつれて、順次尾根と風の作用線との成す角が大きくなり、両風向（東、東北東）共に、前節の単純化半島模型の実験において、非常に強い強風が半島の下流において観測された風向と類似した作用方向となる。

図8-21は、地上及び海面上15mの高さにおいて、同一高さの接近流速で基準化した風速値が、1以上（㊸図）及び1.1以上（㊹図）となる測点（増速されている測点）を風向をパラメータとして示したものである。図より明らかなように、接近流速より1割以上増速される測点は、尾根筋、半島先端部の海峡周辺部、半島の付け根の切通し状地形周辺部、及び、鷺羽山背後の海面上の数点（E、ESE）のみであり、風向が東北東における鷺羽山背後の測点では、単純化地形模型において検出されたような非常に強い風は観測されていない。

そこで、単純化地形模型実験結果を踏まえ、強風が作用する可能性のある地域の横断面（line 6）の風速分布を図8-22に、また、東北東の風向におけるドライアイスを用いた半島周辺部の流れの可視化結果のスケッチを図8-23に示した。

可視化結果は、単純化地形模型とほぼ同様な傾向が示されており、東北東の風向における横断面の風速分布も相対的に風速値が低いものの単純化地形模型の強風分布と類似していることが明らかである。単純化模型と鷺羽山周辺部の気流の相違点として、単純化模型においては、尾根が2次元的に連続しているが、鷺羽山周辺においては、鷺羽山トンネル北出入口付近に切通し状地形が存在し、鷺羽山背後の低圧域に気流が迂回する現象が存在していることが挙げられる。半島状地形の下流側に生じる強風は、半島背後の負圧に大きく依存することが明らかであり、鷺羽山の西側から背後の低圧域に流入する気流の存在が鷺羽山周辺部において、強風現象が生じない理由の一因となっていることが予想できる。また、鷺羽山の背面の傾斜勾配 φ_R は、約27度と比較的緩やかであり、これも強風現象が発生しない一因と考えられる。



① W, $V_g=50\text{m/s}$

② W13N, $V_g=50\text{m/s}$

図8-17 現況における平野部風向分布

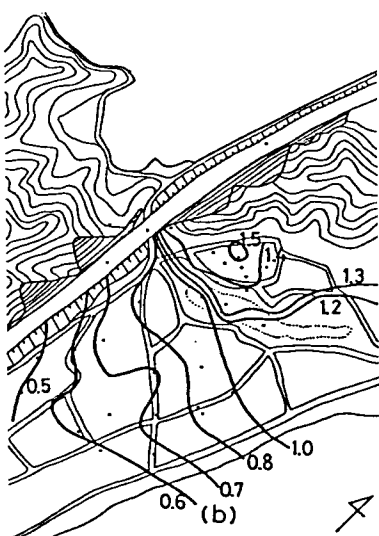
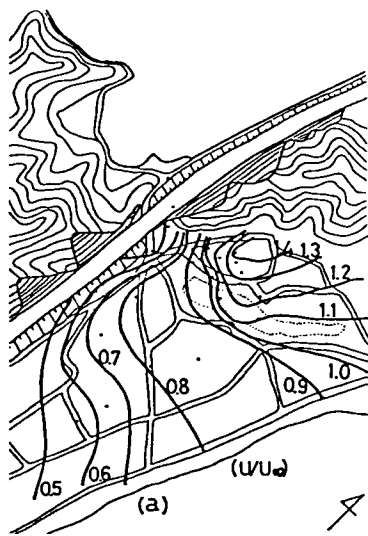


図8-18 平野部風速分布

(①工事前、②工事後、W、 $z=5\text{m}$ 、増速率 $A_z = U(z)/U_\infty(z)$)



図8-19 平野部風速分布
 $U/U(\text{工事前})$

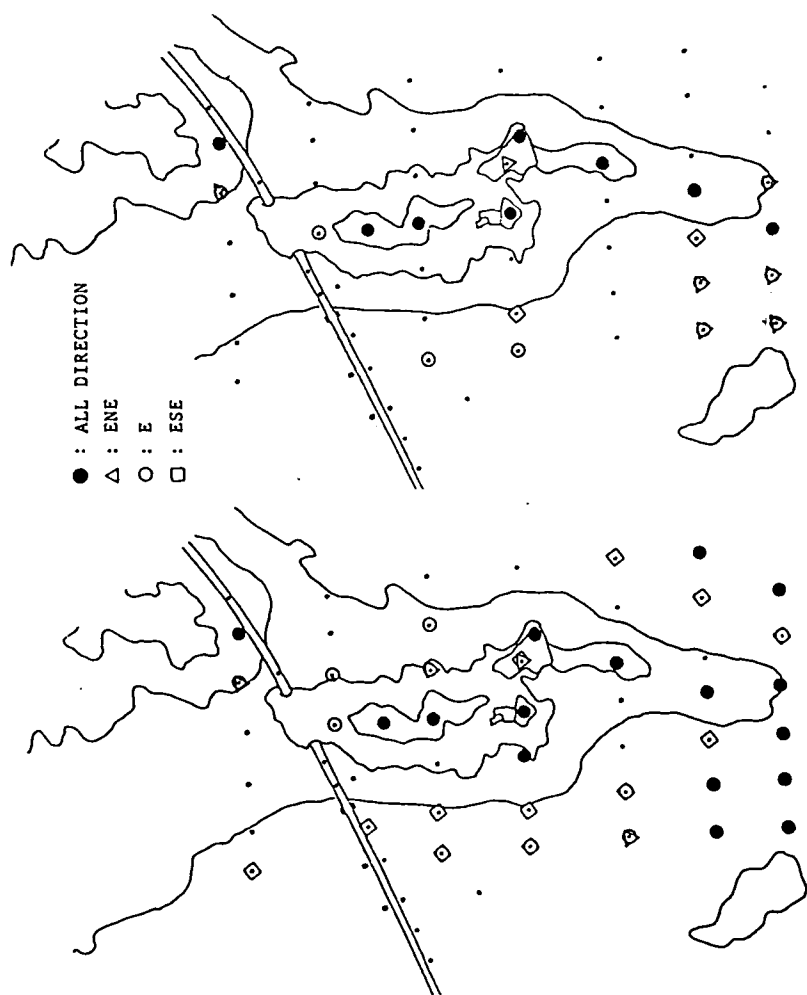


図 8-21 半島周辺の増速域

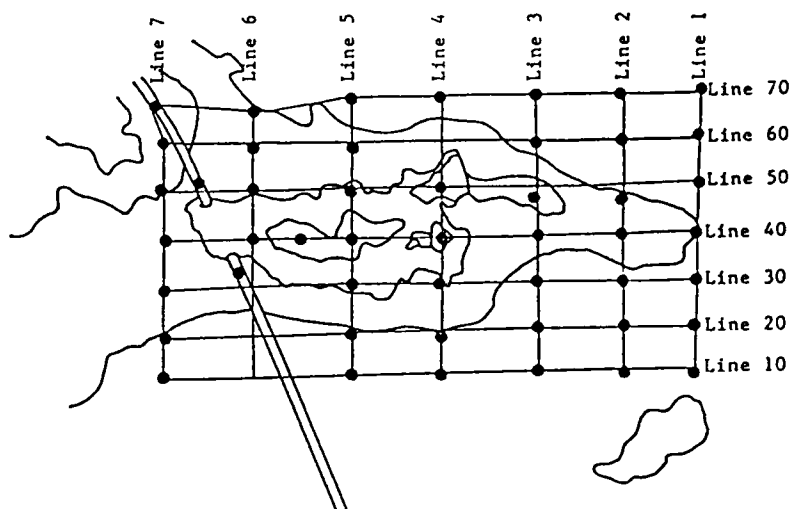


図 8-20 半島上の風向風速計測点

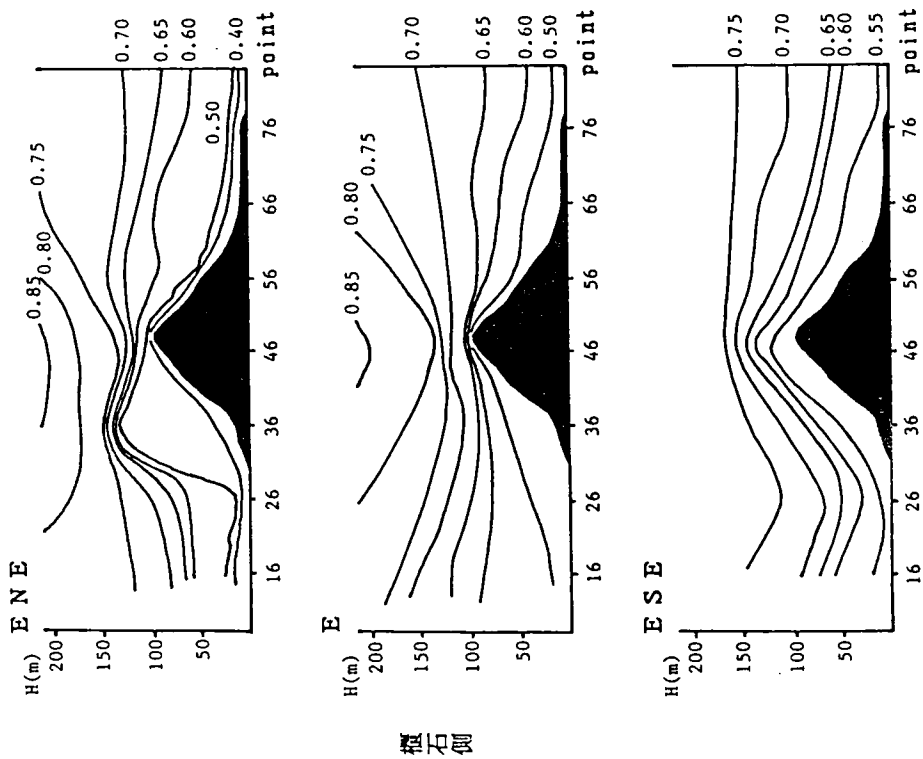


図8-22 半島横断面風速分布 (line 6)

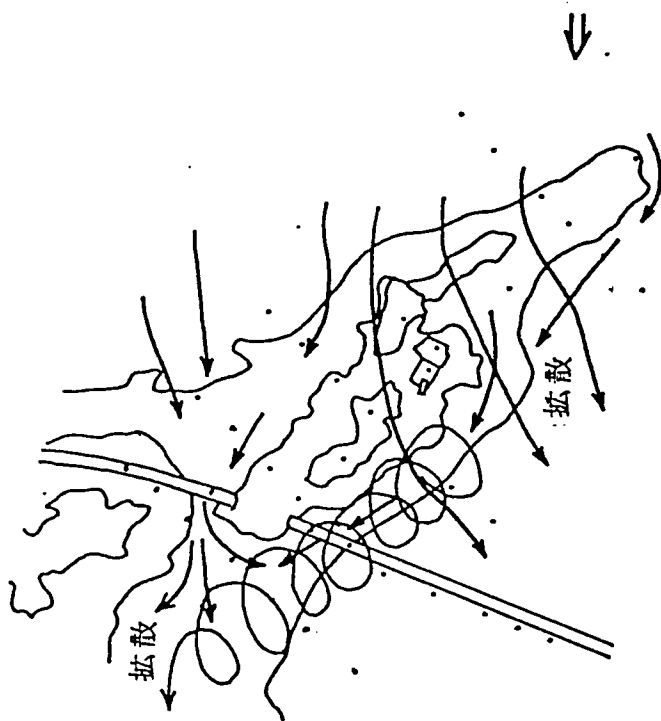


図8-23 半島周辺の流れの可視化スケッチ (ENE)

8-4 結言

半島状地形周辺の風況特性について、縮尺地形模型並びに単純化地形模型を使用した風洞実験によって、強風分布特性、強風発生機構、支配的な地形因子の抽出等に関して詳細な検討を加えた。

その結果、条件さえ整えば（風向・半島の断面形状）、通常は、半島の後流に位置し弱風が作用する半島の背後において接近流速の2倍或は、上空風速以上の強風が地表面付近において作用する可能性がある。そして、この強風現象の発生状況は、尾根の先端部周辺から尾根の背後（負圧領域）に気流が巻き込み、渦を形成し、渦が接近風の作用方向と尾根の成す角の中間的な方向に流下し、渦の回転半径が小さく気流が著しく収束する地表面付近において、渦の回転方向に非常に大きな風速が作用すること（風向によっては、Cookらの調査のように、半島の下流側法面上においても同様の理由によって極めて高い風速が作用する。）が明らかとなった。

この現象は、尾根の形状と作用する風向に大きく依存することも確認され、強風の発生を支配する地形因子は、尾根下流側法面勾配（尾根前縁からの強風出現領域までの距離と風速の強さ）、尾根の上流側法面勾配並びに尾根前縁部の勾配（平野部で観測される風の増速率）、及び尾根の高さ（強風出現領域とその出現高さ）であることが判明した。

また、切通しに気流が傾斜して作用する場合にも、条件さえ整えば単独の半島状地形における強風現象と同一の極めて局所的な強風現象が発生することも示された。（例えば、切り通しを有する2つの尾根に囲まれた小平野部の尾根直背後の小領域に作用する”しもにし”とよばれる強風）

第9章 構造物周辺地形の構造物に及ぼす耐風工学的影響評価

9-1 概説

前章までに、周辺地形の風況特性に及ぼす影響について、現地観測、縮尺地形模型実験及び単純化地形模型（丘、谷、切通し、及び半島）を用いた風洞実験並びに気象官署における定時風観測データを用いた解析等によって検討を加えてきたが、本章においては、構造物建設点周辺の地形が構造物に及ぼす耐風工学的な影響評価の方法論について簡単に考察を加えるものである。なお、構造物（橋梁）の耐風設計の概要は、第1章において簡単に報告しているが、構造物の耐風性に影響を及ぼす気流特性として、各風向毎の、最大風速、風速発現頻度、乱れの強さ、スケール、空間相関、鉛直風速分布、及び、風速の鉛直傾斜角（迎角）等が挙げられる。そして、前章までの調査検討結果から、これらの気流特性は構造物周辺地形の影響を大きく受けることが明らかであり、周辺地形特性と構造物の建設地点の相対的な位置関係を考慮することによって、周辺地形の構造物に及ぼす耐風工学的影響を明らかにするとともに、より合理的な耐風設計法のあり方についても若干の考察を加えるものである。なお、具体的な適用例としては、実構造物の振動記録・風洞実験結果及び風況特性の揃っている関門橋と因島大橋の主塔の渦励振振動に注目し、周辺地形の耐風安定性に及ぼす影響を検討する。

また、構造物自身によっても、局所的な増速現象が誘発する場合も存在し、使用性に問題を及ぼす可能性も考えられる。ここでは、走行車輛に及ぼす影響と関連して長大橋梁の耐風安定化装置並びに吊橋主塔周辺部の風況調査を行ない、構造物自身による増速現象について若干の考察を加えるものである。

9-2 小地形の構造物に及ぼす耐風工学的影響評価

構造物の耐風安定性を議論する場合、静的な問題と、動的な問題が考えられ、特に、長大橋梁においては、静的な耐風安定性（ガスト応答も同時に考慮した静的荷重による部材応力、及び、静的不安定現象（ダイバージェンス・横座屈））が確保された断面形状の動的な耐風安定性が重要であり、風洞実験によって耐風安定性の検討と、耐風安定化対策が試行錯誤的に考案されている。⁹⁻¹¹⁾

橋梁の各構成要素において考慮すべき動的現象は、表9-1に示した振動現象であり、各振動現象に及ぼす気流の及ぼす影響を3段階評価し（○：影響度大、△：影響があると

表9-1 動的不安定現象と気流特性の及ぼす影響度

	振動現象	振動現象に及ぼす気流特性の影響度						
		風速	風向	風速の鉛直分布	迎角	乱れの強さ	スケール	空間相関
橋桁	バフエッティング	○	○	—	○	○	△	△
	渦励振	○	○	—	○	○	△	△
	フラッター・ギャロッピング	○	○	—	○	○	△	△
塔	バフエッティング	○	○	○	—	○	○	△
	渦励振	○	○	○	—	○	△	△
	ギャロッピング	○	○	○	—	○	△	△
ケーブル	渦励振	○	○	—	—	○	△	△
	ギャロッピング	○	○	—	—	○	△	△
	rain vibration ⁹⁻²⁾ - 9-5)	○	○	—	—	△	△	△
	塔・ケーブルの後流によって生じる振動	○	○	—	—	○	△	△
	塔の振動に伴なうケーブルの振動	○	○	—	—	○	△	△

ここに、○：各振動現象に及ぼす影響が大きいと考えられる。
△：影響があると考えられるが明確な評価が確立していない。
—：ほとんど影響が無視できる。

考えられるが明確な評価が確立していない、—：ほとんど影響が無視できる。）、併せて示した。

気流特性の構造物の動的不安定性に及ぼす影響を以下に簡単にまとめる。

- ①まず、バフエッティング振動に注目すると、変動風速に含まれる対象橋梁構成要素の固有振動数と一致した乱れの成分の及ぼす影響が大きく（変動風速のスペクトルを用いた変動風速の周波数特性によって議論すべきであるが、ここに分類した気流特性を用いると、大まかではあるが乱れの強さとスケール（変動風速のエネルギーピークの周波数との対応によって評価する。）の組合せで表現でき、構造物の固有振動数成分の変動気流成分が気流中に多く含まれると振動が大きくなる。）、作用する風速の増加に伴って応答振幅が増大する。また、平均風速の作用方向（風向）の影響も無視できない。さらに、橋桁においては、鉛直傾斜角（迎角）が、また、独立塔では、平均風速の鉛直分布が重要となる。
- ②次に、渦励振現象に対しては、平均風速（各要素の固有振動数と断面形状に起因する限定された風速領域のみに発生する。）、及び、風向（ケーブルを除く）の影響（特に、独立塔においては、橋軸直角方向から±20度以上偏った方向から気流が作用すると渦励振は生じなくなることも報告されている。⁹⁻⁶⁾）が大きい。また、渦励振は、断面周辺に形成される各種の渦（振動に起因する渦、Kármán渦等⁹⁻⁷⁾）によって発生する振動現象であり、この渦の生成・発達、乱れの影響を大きく受けることが明らかになってきている（特殊な断面形状（例えば、扁平六角形断面等）を除いて、乱れの強さの増加に伴って振動振幅が減少し、非常に乱れた乱流中においては、渦励振は生じない。）が、乱れのスケールの及ぼす効果については、依然議論の余地があると考えられ△印を

付与している。

③フラッタ（ねじれフラッタ、曲げねじれフラッタ）及びギャロッピングは、破壊的振動であり、設計基準風速に風速変動に関する係数並びに構造物の社会的重要性等を考慮した安全率を乗じた風速領域で発生しないことが条件であるが、表に示した各気流特性の影響を受けることが明らかである。

なお、気流の空間相関の影響として、空間相関が高いほど振動振幅は増加すると考えられるが、空間相関の低下に伴う定量的な振動振幅減少効果が明かとなっていないことを考慮して、各振動現象に及ぼす影響度を△印としている。

さて、各動的不安定現象に及ぼす気流特性の概要を紹介したが、構造物周辺地形がこれらの気流特性に及ぼす影響について簡単に示したものが図9-1である。第6章（2次元丘）から前章（半島状地形）までに単純化地形模型を用いた風洞実験結果から得られた風速と乱れの強さの大まかな特性を簡単に示したものであり、各地形特性の任意点に及ぼす影響は前章までの検討結果を用いると推定可能であるが、地形特性によってその影響が複雑に変化しており、ここでは省略している。一般的には、風速が増速される領域において、乱れの強さが低減しているが、半島の尾根とある偏った方向から気流が作用した場合には、半島の後流部に気流が巻き込みながら流入するために、増速効果は著しく大きくなる（接近流速の2倍程度）が、乱れの強さは接近流と同程度のかかなり大きな乱れを有している。図中には、風向特性を示していないが、小地形周辺部においては、接近流と異なった方向に気流がひずむこと（例えば、谷・切通しの流入・流出部、尾根の背後等）も多々あり、注意が必要となる。

以上の結果、各小地形特性の構造物の動的耐風安定性に及ぼす影響が、風況特性に及ぼす影響を考慮することによって間接的に評価できることが明かとなった。なお、構造物に作用する風は、建設地点周辺の小地形のみならず、かなり広領域の地形特性（メソスケール）の影響も受けることが知られており、この点も同時に検討する必要がある。

上記のように、構造物周辺地形特性から、構造物の耐風安定性に及ぼす影響が推定できる可能性を示したが、次に、構造物の耐風安定性に及ぼす周辺地形特性の影響を実構造物を対象として具体的に検討してみる。注目した構造物は、関門大橋と因島大橋の独立時の主塔であり、渦励振応答に及ぼす周辺地形の影響（発現可能性）を検討する。

まず、図9-2に両吊橋の一般図を示す。中央径間長は、関門橋が712m、因島大橋が770mであり、主塔高さ（約135m）・形状共に良く類似している。

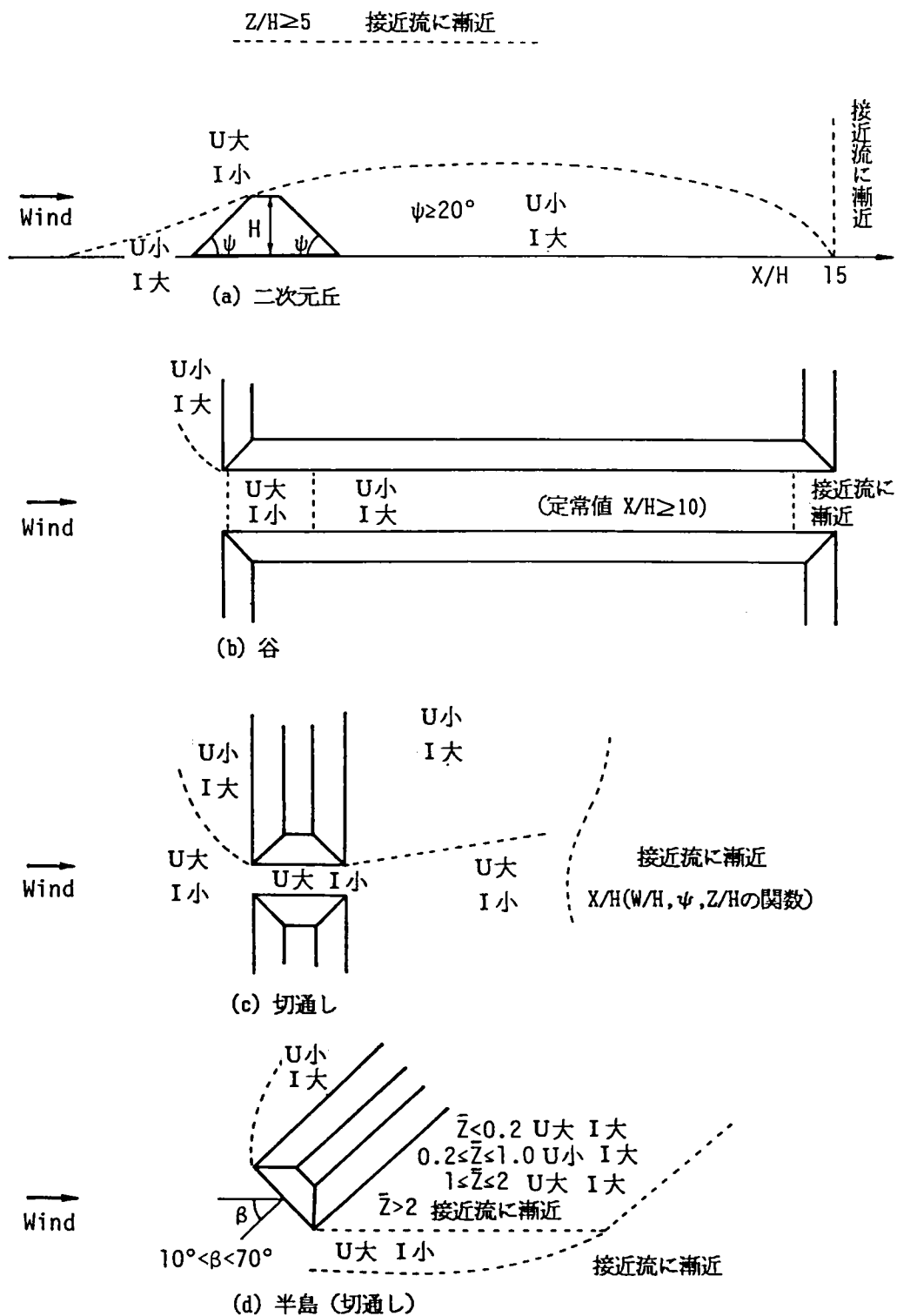


図9-1 小地形の風況特性に及ぼす影響の概要

両吊橋の独立塔の風洞実験結果を図9-3（関門橋）⁹⁻⁶⁾、図9-4（因島大橋）⁹⁻⁸⁾に示す。実験は、共に一様流で実施し、対数減衰係数 δ は、関門橋が0.028と因島大橋(0.01)の約3倍となっている。したがって、応答振幅の直接的な比較はできないが、関門橋の渦励振応答発現領域は、約12-16m/sであり、因島大橋(約9-13m/s)より高風速域である。また、前述のように、関門橋主塔の渦励振は、水平偏角が20度以上では発生していない。

さて、両主塔の耐風安定性は、渦励振発現風速が若干異なるものの、ほとんど差のないことが示されたが、自然風的作用による実構造物の応答には、大きな差が生じている。すなわち、関門橋の主塔は、昭和45年9月から現場架設を開始し、昭和46年2月に組み立てが終了し、同年6月まで独立塔であり、ホーリングロープ及びキャットウォークロープ架設工事中に台風19号(8月5日、図9-5に経路を示す。)が、九州西部から日本海へと通過しているが、工事中には渦励振は生じていない。一方、因島大橋主塔は、冬期季節風及び台風(7916号、7920号、図9-5に経路を示す。)によって渦励振が生じ、スライディングブロックを用いた制振装置が付加されており、応答記録の一例を図9-6に示す。⁹⁻⁹⁾ また、図9-7には、風洞実験結果との対応(㊟図)⁹⁻⁸⁾並びに平均風向と応答の対応関係⁹⁻⁹⁾を示した。渦励振応答は、橋軸直角から±20度の範囲で生じ、風洞実験結果とも良く一致している。

このように、両吊橋主塔の実応答は大きく異なっているが、この両者の応答特性の差は独立塔の期間が大きく異なること及び関門橋の主塔の渦励振発現風速が因島大橋より高風速であること等の影響も考えられるが、周辺地形特性の差に起因している可能性も大いに考えられる。そこで、以下に、両吊橋周辺の地形特性の風況特性に及ぼす影響を前章までの結果を参照して推定し、両主塔の渦励振発現可能性を検討した結果を簡単に示す。

関門橋及び因島大橋周辺の地形図を図9-8に示す。風の作用する方向によって、地形の風況特性に及ぼす影響が異なることが前章までの調査から明らかであるので、ここでは、上空風の風向として、橋軸直交方向、橋軸直交方向から±20度偏った方向(渦励振が発生する限界の方向)、さらに、気流の地形による湾曲も考慮して橋軸直交方向から±40度偏った方向(片側5風向、各主塔それぞれ合計10風向)を対象として、周辺地形の気流特性に及ぼす影響を検討することとし、図9-8中に、上空風の作用線を併せて示した。

まず、関門橋の下関側主塔に注目する。周辺地形の特徴として、北東方向の風向においては、主塔の陸側に高さ86mの稲荷山(橋床面より高い)及び、主塔の上流側に橋軸直

角方向から約17度偏った方向に約1.5km 離れて主塔より高い火の山(260m)があることが挙げられる。火の山の主塔周辺部に作用する気流に及ぼす影響として、①後流の形成(風向A、B、乱れの増大、風速低減、及び、風向変動大、2次元丘(6-3節、図6-5、6)及び児島坂出ルート周辺部の風洞実験結果(上流側の島の効果、5-3-3項、図5-13、19)参照)、及び、②火の山と門司側の古城山(門司側主塔の東170m、高さ175m)によって切通し状地形を形成(さらに、広い領域を対象とすると、火の山と霊鷲山及び門司側全体の山によって切通しが形成されている。)し、主塔付近における北東の風向を東寄りに湾曲(南西風においては西寄りに偏る。)させ、作用する風を橋軸直交方向から偏らす効果(風向B、C、D、E、F、切通し周辺部(7-2-2項、写真7-1、図7-20、21)参照。なお、この地形特性は、門司側主塔にも同様な影響を及ぼす。)等が挙げられる。また、下関市街地上を通過した気流が海峡部に巻込んでくる場合(風向F')も存在しているが、この風向においては、市街地上の地表粗度が粗いことに起因して乱れの強さが大きくなり、渦励振を抑制する効果が大きいことが期待できる。

また、門司側主塔に大きな影響を与える地形として、東寄りの風向時における塔上流側の切り立った半島状地形(和布刈公園周辺部)が挙げられる。前述のように、東寄りの風向においては、火の山山系と門司側の山によって形成される海峡の中央部に気流が収束し、主塔には和布刈公園周辺部からの剥離流が作用し、主塔上部は増速された気流が作用するものの主塔下部はその後流に含まれ、渦励振が抑制され则认为られる。(近接した上流側小地形の下流側に及ぼす効果の一例として、6-4節、図6-17の与島東部の風速に及ぼす小与島の影響、及び、前述の2次元丘の結果等が参照できる。)西寄りの風向では、風師山の影響(後流域に含まれる。風向D、D')が大きい。

次に、因島大橋の周辺地形が風況特性に及ぼす影響を検討するが、因島大橋の周辺地形特性も関門橋周辺の地形同様かなり起伏に富んでいるが、関門橋周辺部と異なる点は、①橋梁近傍の上・下流側に極めて高い山が存在していないことと、②周辺部の高い山によって形成される切通し状地形の尾根筋と橋梁軸がほぼ一致していることが挙げられる。

したがって、主塔が山の後流域になる風向が少なく、橋軸直交方向から偏った気流が上空に作用しても、橋梁の左右に存在する尾根によって、橋軸直交方向に気流は収束し、渦励振の発生し易い状況が生じている(気流の増速、乱れの強さの低下、スケールの増加、鉛直方向の風速差の減少(谷及び切通し状地形における増速効果は、地表近くの測点ほど大きく、相対的な風速差が小さくなる。))と考えられる。

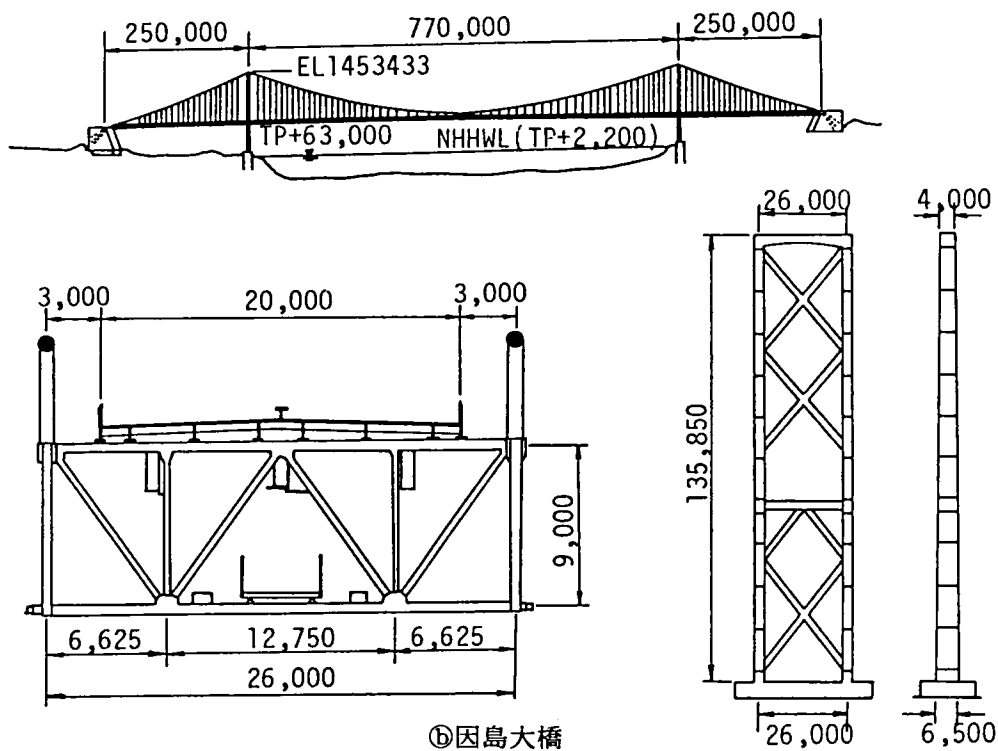
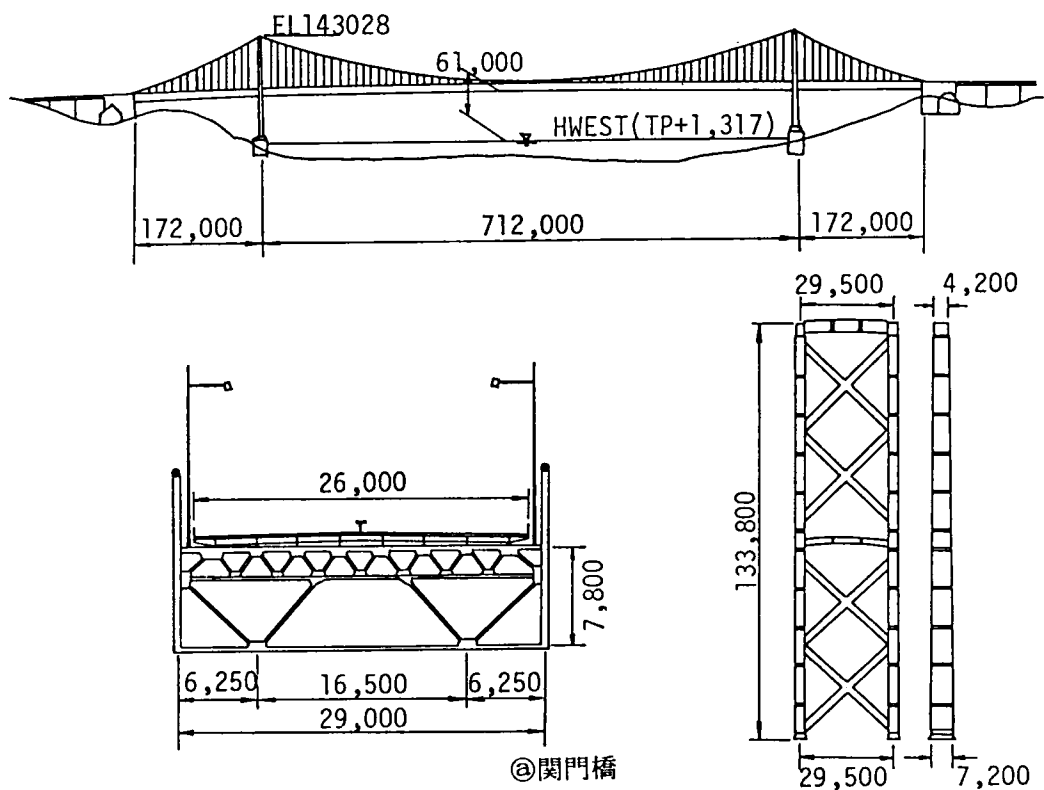


図 9 - 2 関門橋並びに因島大橋の一般図

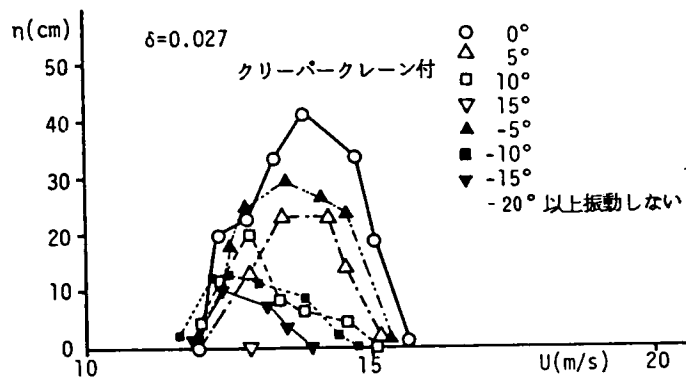
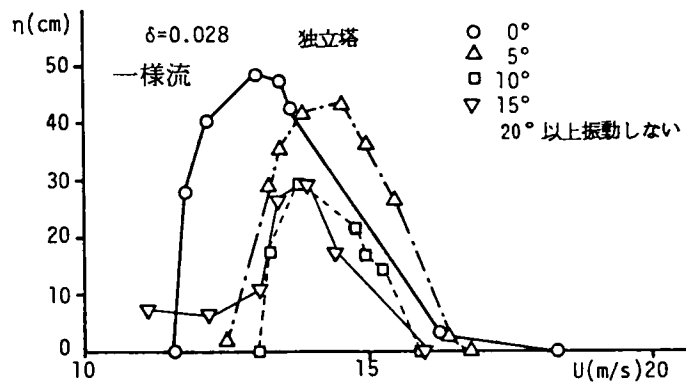


図 9-3 関門橋主塔の風洞実験結果⁹⁻⁶⁾

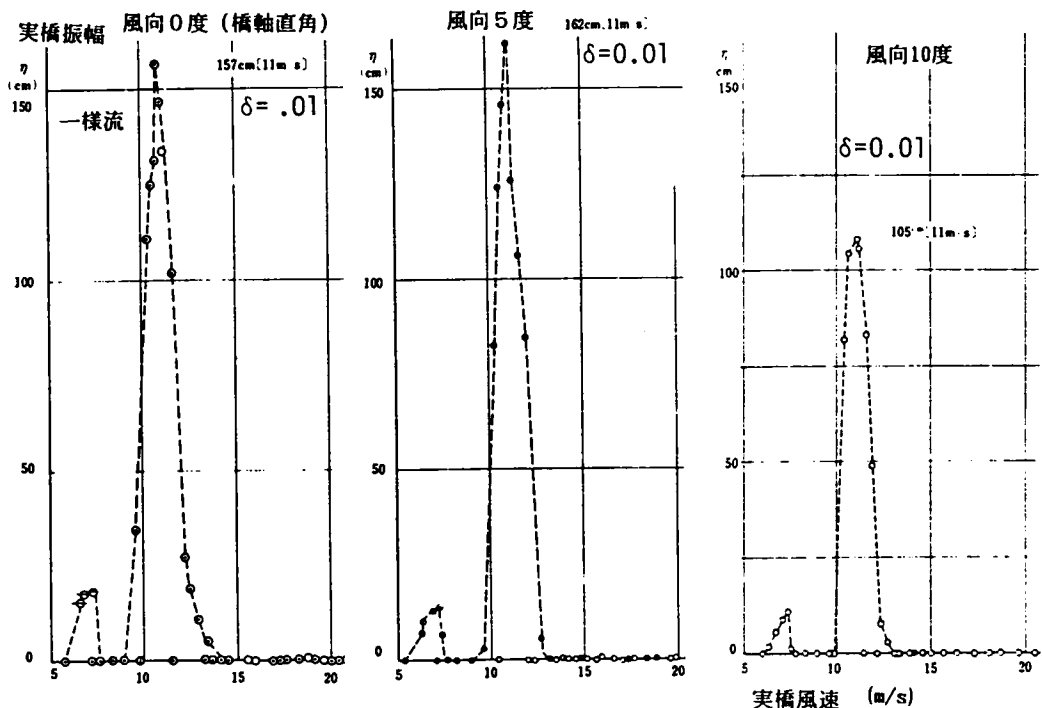


図 9-4 因島大橋主塔の風洞実験結果⁹⁻⁸⁾

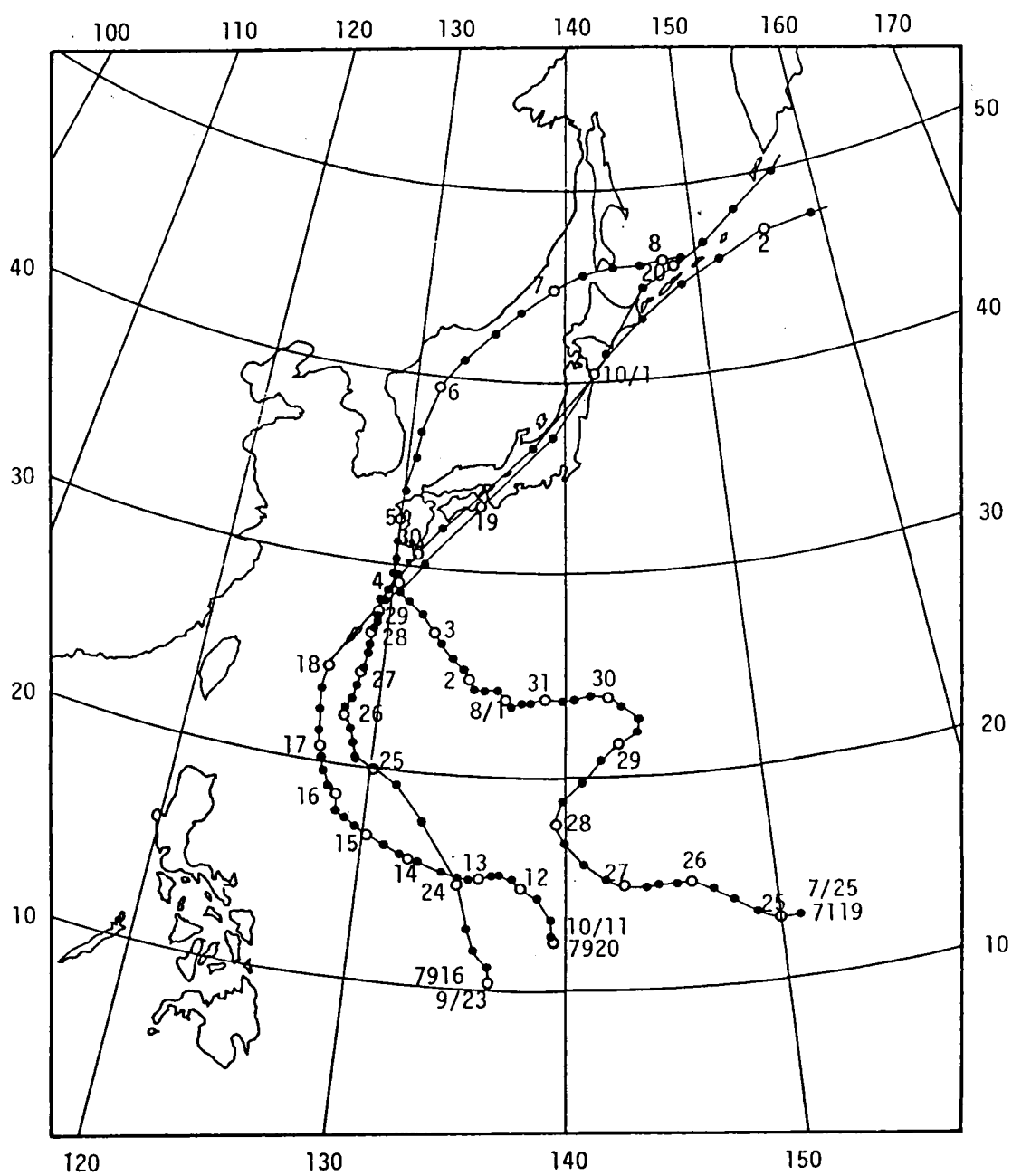


図9-5 台風経路図

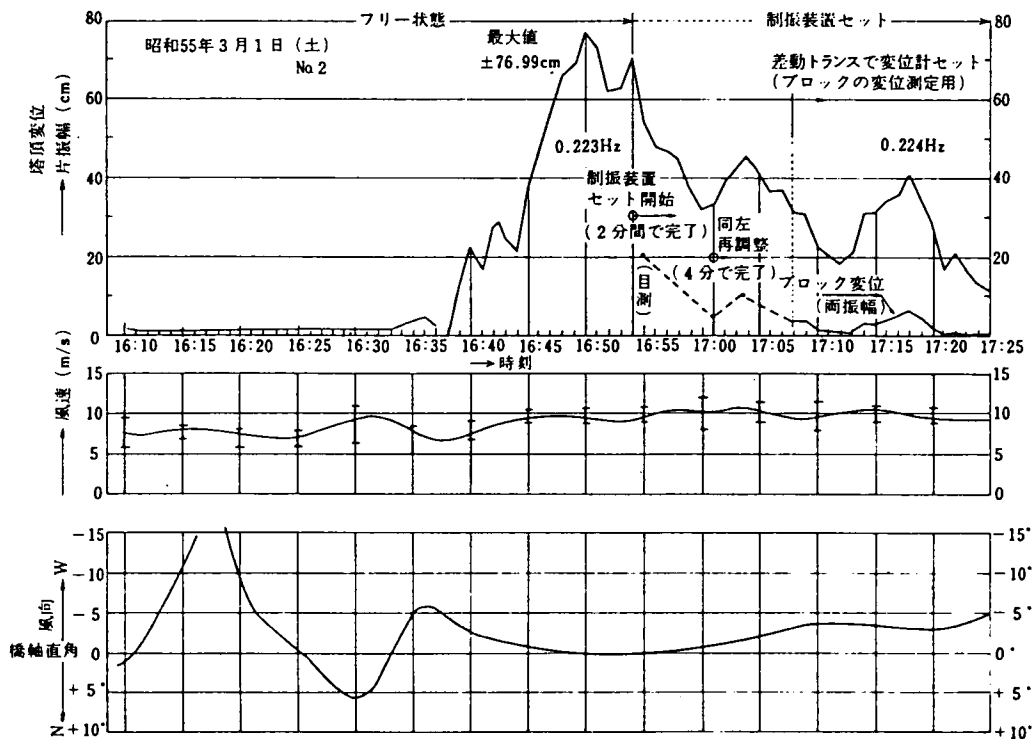


図9-6 因島大橋主塔の渦励振応答観測記録⁹⁻⁹⁾

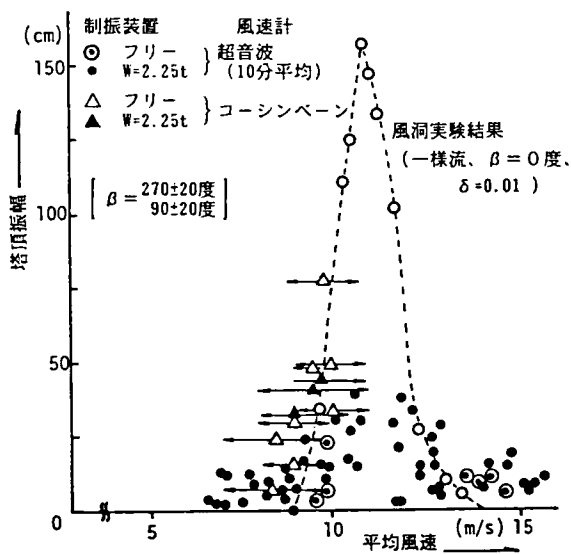


図9-7 ㉔ 因島大橋主塔の渦励振応答と風洞実験結果の比較⁹⁻⁸⁾

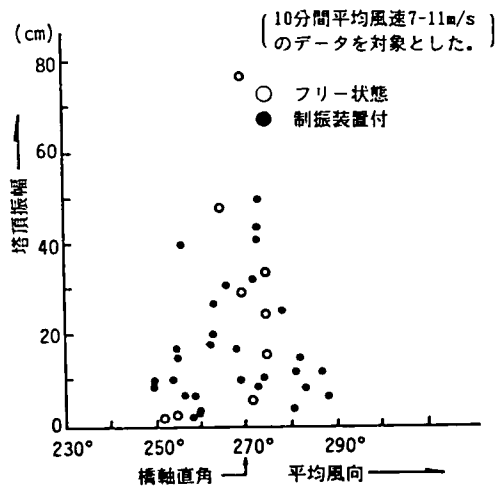


図9-7 ㉕ 平均風向と主塔の渦励振応答振幅⁹⁻⁹⁾

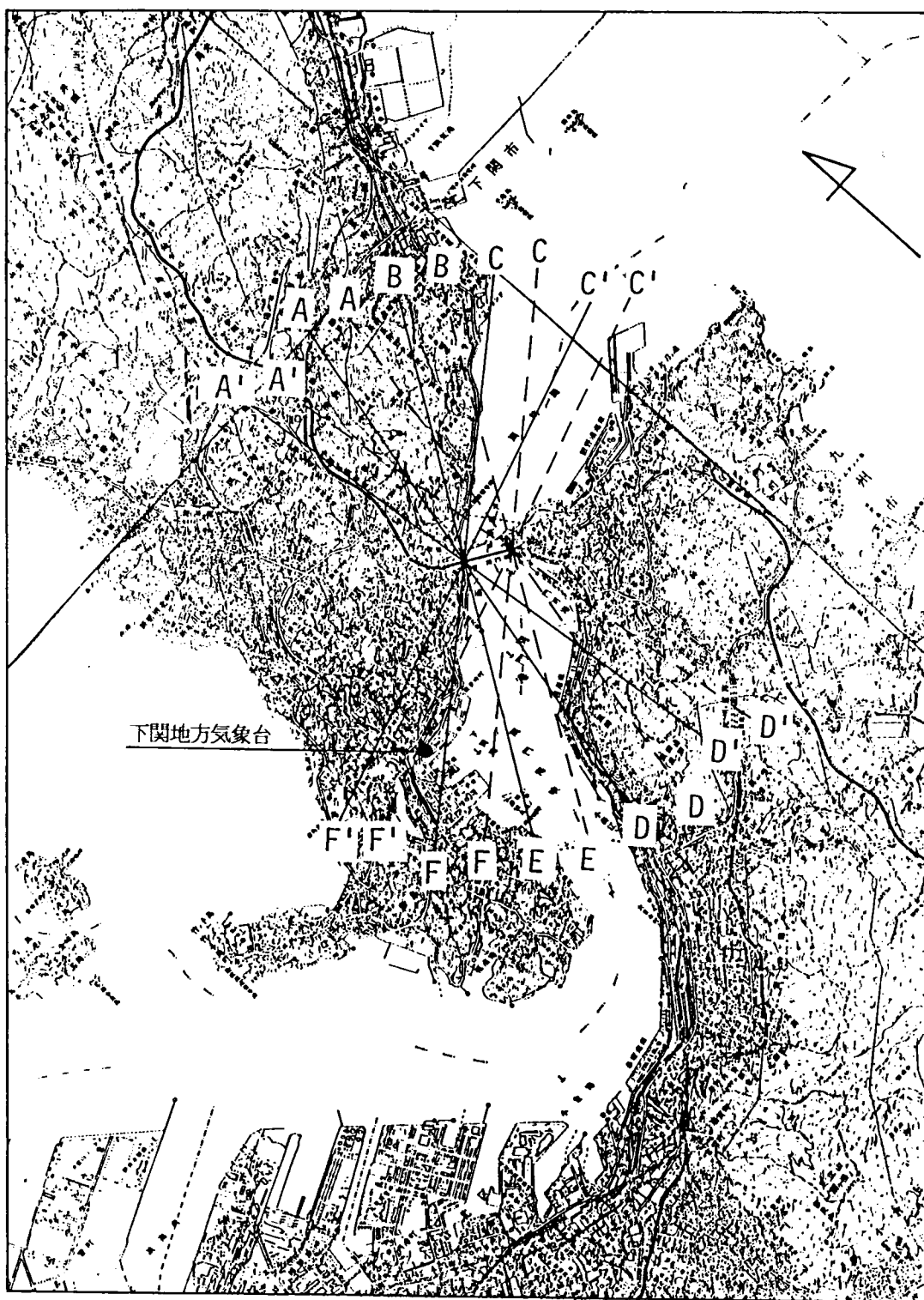


図 9 - 8 ④関門橋周辺地形

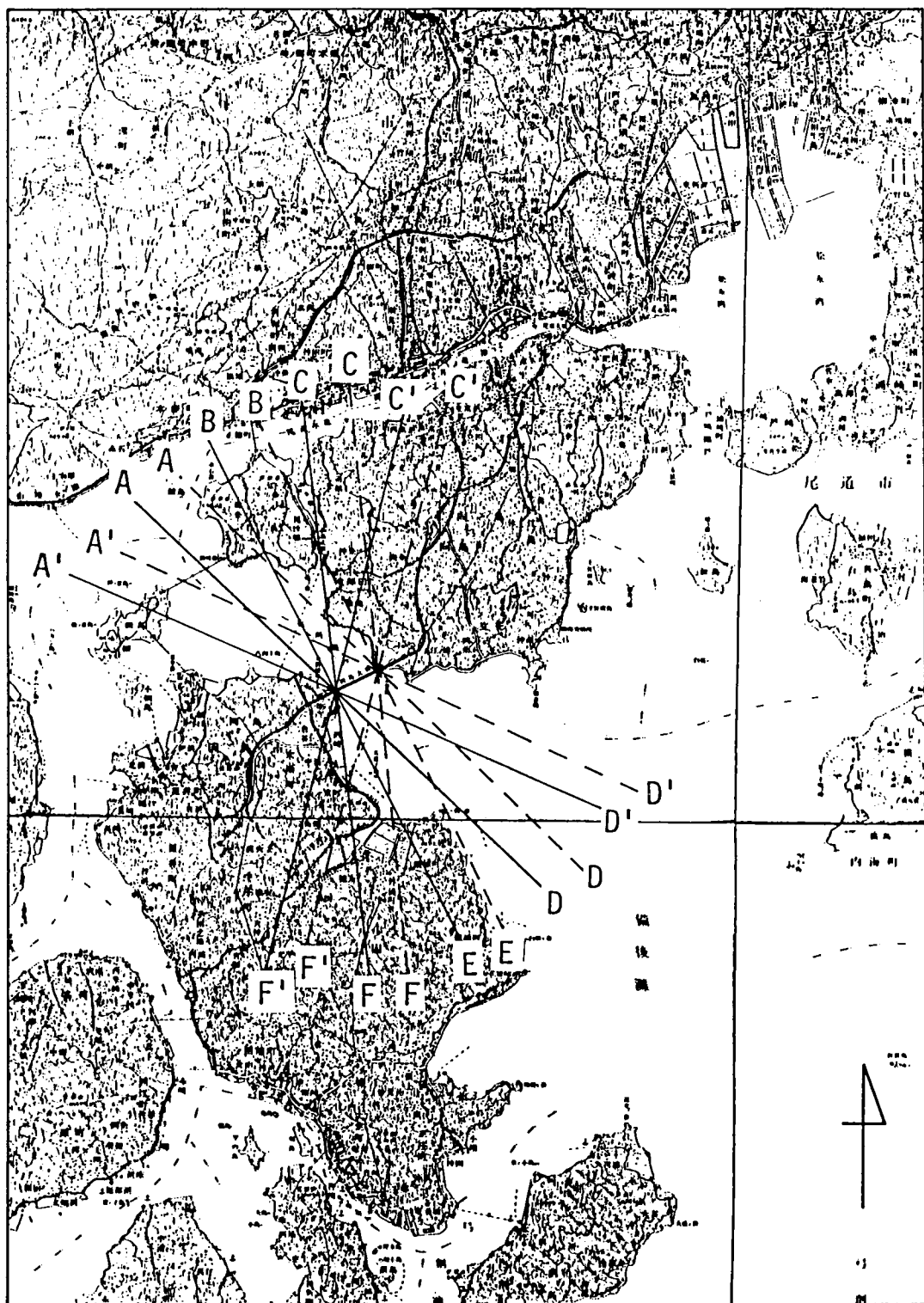


图 9-8 ⑥因島大橋周辺地形

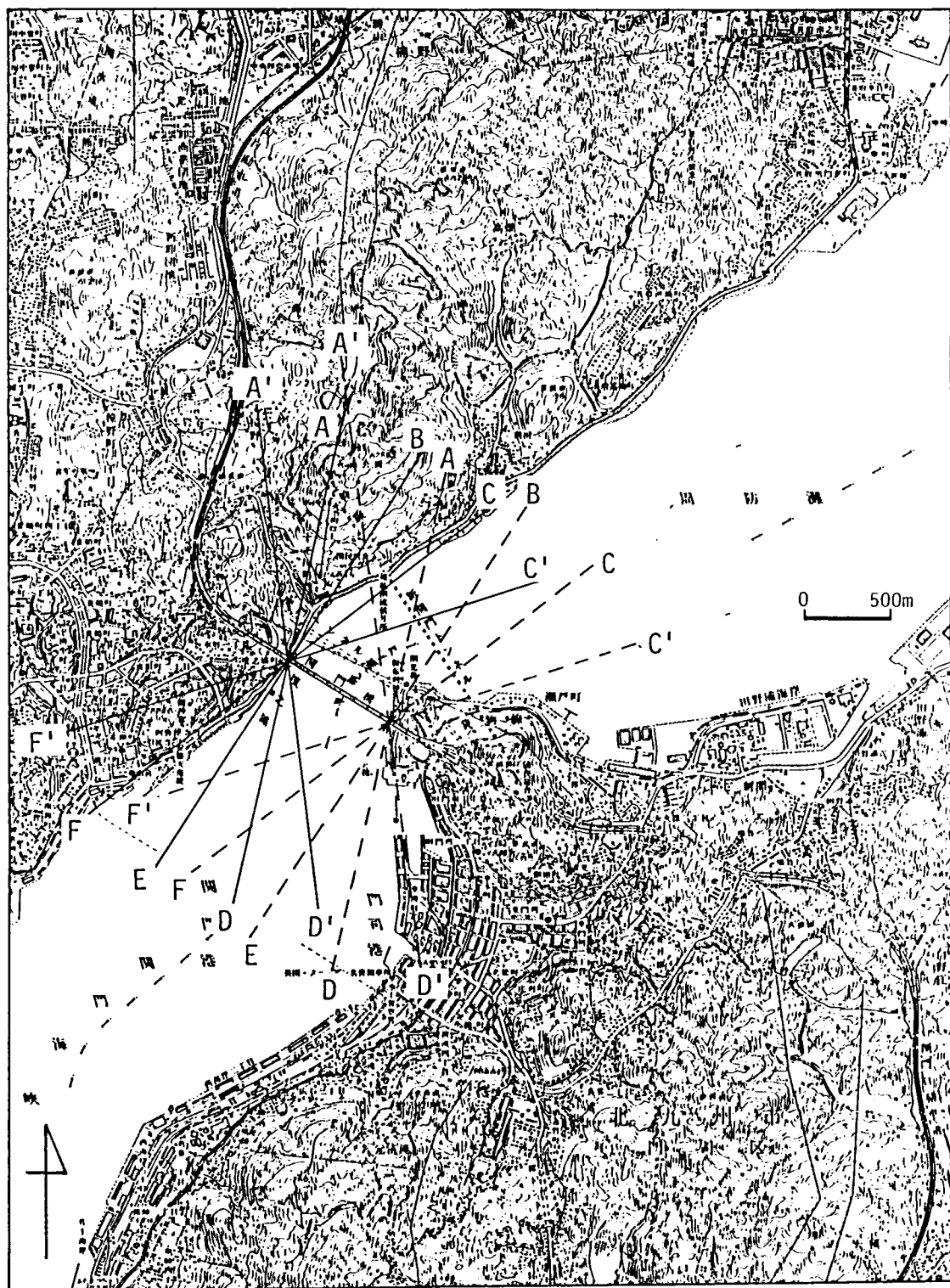


図 9 - 8 ◎関門橋周辺詳細地形

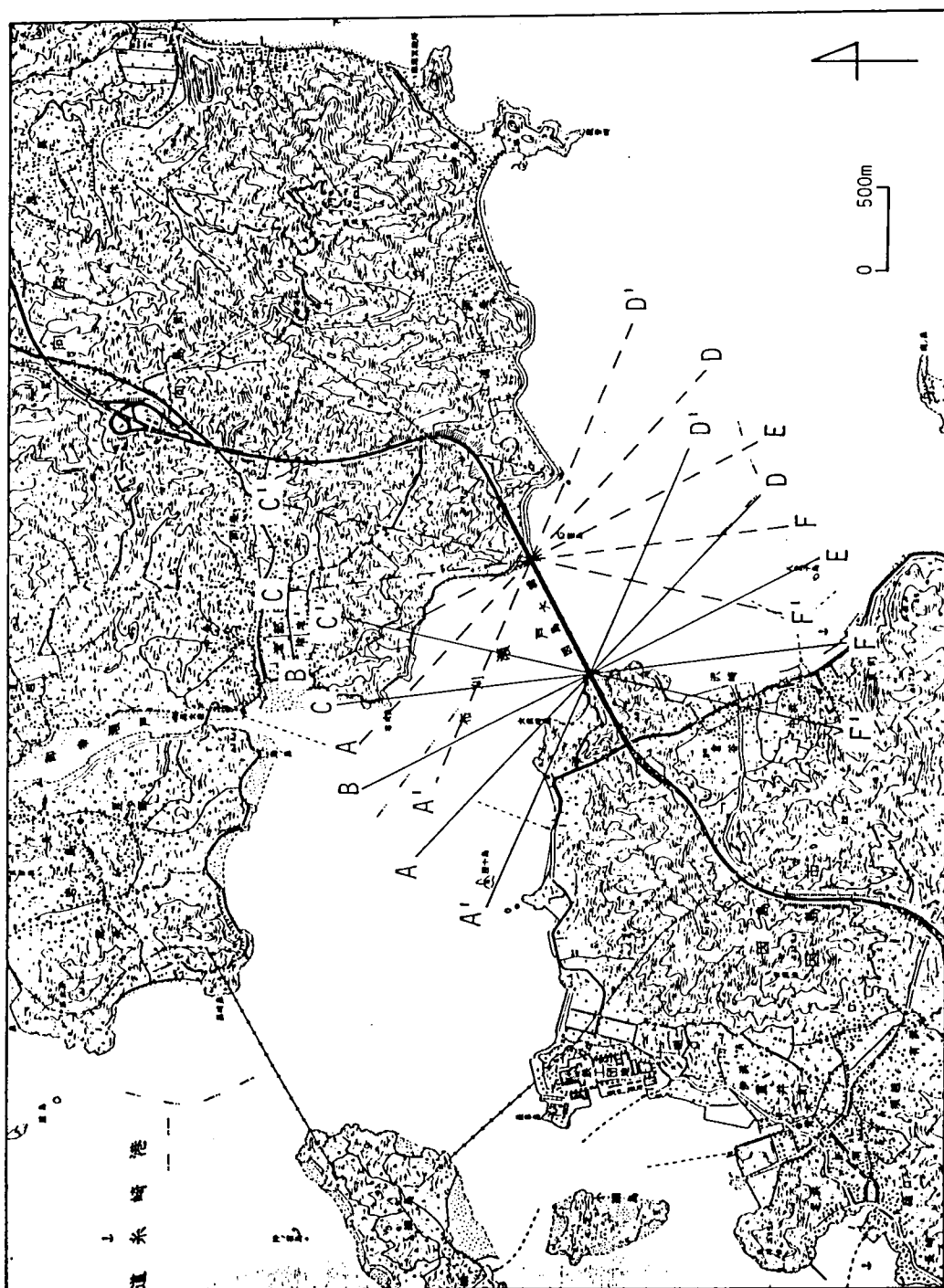


図9-8 ④因島大橋周辺詳細地形

以上の考察結果を簡単にまとめると、表9-2（関門橋）、表9-3（因島大橋）のようになる。

表9-2（関門橋）、表9-3（因島大橋）は、周辺地形の両吊橋の左右の各主塔部に作用する気流に及ぼす影響（すなわち、独立塔の渦励振に影響を及ぼす気流特性の概要）及び、その気流特性から総合的に判断した主塔の渦励振発現可能性（○：平均風速レベルが一致すると振動が発生する可能性が極めて高い、X：渦励振の生じる可能性が極めて低い、△：渦励振の発生可能性もある、▲：非常に稀ではあるが、振動する可能性が残されている、と評価した。）を、上空風の風向毎に示したものである。

また、気流特性欄に示した記号は、ある接近流の気流特性が周辺地形によって独立塔の渦励振に悪影響を及ぼす特性に変化すると考えられる場合にX印を、逆に、振動発生を助長する特性に変化すると考えられる場合に○印を付与した（平均風速（○：増速効果、X：減速効果）、風向（○：橋軸直交方向に変化する、X：橋軸直交方向と大きく異なる、又は、風向変動が大きくなる。）、乱れの強さ（○：乱れが小さくなる、X：乱れが大きくなる。）、平均風速の鉛直分布（○：鉛直方向に差が小さくなる、X：風速差が拡大する。）、空間相関（○：相関が高くなる、X：相関が低くなる。））。そして、影響因子が多数考えられ明確な影響度が定かでないときに△印を用いている。なお、前章までに得られた周辺地形の風況特性に及ぼす影響は、主として、極めて単純化した地形（台形断面の単一地形）を対象としており、ここで検討している複雑な地形の風況特性を精度よく推定するにはデータが明らかに不足しており、定性的な推定を行なったにも拘らず△印を付した風況特性も多く残されており、基礎データの充実が望まれる。

また、渦励振発現可能性は、渦励振の生じる付近の風速が作用している状況において、各気流特性から総合的に判断しているが、風洞実験並びに現地振動観測結果等を参照し、①風向、②風速と乱れの強さ、③風速の鉛直分布、④空間相関の順に影響度が大きいと考えている。特に、上空風と一致した風向の風が主塔付近の高さにおいて作用した場合、元来渦励振が生じない橋軸直交方向から40度偏った風向（A'、C'、D'、F'）において、渦励振発現可能性を支配する主たる要因は風向であり、この点を考慮して、各主塔の渦励振発現可能性（△、▲、X）を判断している。

表から明らかなように、関門橋の主塔は南南西・南西の風向（E、F）において渦励振が生じ易く、因島大橋の主塔は、共に渦励振の発現可能性が示され、特に、北寄りの風向においては因島側の主塔の渦励振発現可能性が高くなっている。

表9-2 上空風向別周辺地形の気流特性並びに主塔の渦励振に及ぼす影響度：関門大橋

	風向	影響度の大きい主たる地形特性 及び風況の概略	各気流特性に及ぼす影響度					渦励振に 及ぼす 影響度
			風速	風向	乱れの強さ	風速の鉛直分布	空間相関	
門 司 側 主 塔	A'	火の山 (H=260m, L=1.5km) の後流	△	△	△	△	△	X
	A	火の山山系の後流	△	○	△	△	△	△
	B	気流が海峡方向にひずみ（火の山山系と門司側の山系の走行の中間方向）、直前の小丘からの剥離流の影響を受ける。	○	△	△	△	△	△
	C	直前の小丘の剥離流及び古城山 (H=175m, L=700m) の迂回流れの影響を受ける。	△	X	△	△	△	X
	C'	直前の小丘の剥離流及び古城山の後流	X	X	X	X	X	X
	D'	風師山 (H=360m, L=4km) 山系の後流	X	X	X	X	X	X
	D	風師山 (H=360m, L=4km) 山系の後流	△	○	△	△	X	△
	E	障害地形なし	○	○	○	○	○	○
	F	障害地形なし	○	○	○	○	○	○
	F'	下関市街地の下流・直背後の小丘の風速低減効果	△	○	△	△	△	▲
下 関 側 主 塔	A'	火の山 (L=1.3km) 山系周辺部（中国自動車道沿い）からの吹き出し	△	△	△	△	△	X
	A	火の山の後流	X	X	X	X	X	X
	B	火の山山系の後流	△	△	△	△	△	△
	C	火の山山系と門司側の山系の走行の中間方向に気流が偏る。	○	△	○	○	○	△
	C'	障害地形なし	○	△	○	○	○	▲
	D'	風師山 (H=360m, L=4km) 山系の後流	△	△	△	△	△	X
	D	戸上山 (H=520m, L=8km) 山系の後流並びに火の山山系と門司側の山系の走行の中間方向に気流が偏る。	△	△	△	△	△	△
	E	火の山山系と門司側の山系の走行の中間方向に気流が偏る。	○	△	○	○	○	○
	F	火の山山系と門司側の山系の走行の中間方向に気流が偏る。	○	△	○	○	○	△
	F'	下関市街地の下流	△	△	△	△	△	X

ここに、各気流特性に及ぼす影響度の欄における記号の意味は、以下のようである。

○：渦励振振動を助長するような影響を受けると考えられる。

X：渦励振振動が抑制されるような影響を受けると考えられる。

△：気流特性に及ぼす影響がほとんど無い、或は、影響因子が多く明確な影響度が定まらない。

また、渦励振に及ぼす影響度の欄における記号の意味は、渦励振領域の風速の風が各風向から作用した時の渦励振の発現可能性を示したものである。

○：渦励振振動の発現可能性が極めて高いと考えられる。

△：○より渦励振振動の発生率は、低いものの振動する可能性が残されている。

▲：ほとんど振動は生じないと考えられるが、稀に振動が生じる可能性もあると考えられる。

X：渦励振振動の発現可能性が極めて低いと考えられる。

表9-3 上空風向別周辺地形の気流特性並びに主塔の渦励振に及ぼす影響度：因島大橋

	風向	影響度の大きい主たる地形特性 及び風況の概略	各気流特性に及ぼす影響度					渦励振に 及ぼす 影響度
			風速	風向	乱れの 強さ	風速の 鉛直分布	空間 相関	
因島側主塔	A*	上流側の半島状地形を迂回し、海峡部に流入	○	○	○	△	△	△
	A	上流側の半島状地形を迂回し、海峡部に流入	○	○	○	○	○	○
	B	海峡と平行（障害地形なし）	○	○	○	○	○	○
	C	向島及び因島北部の山（上流側）の影響により橋軸直交方向に気流が作用する。	○	○	○	○	○	○
	C*	向島の山の後流	△	○	△	△	△	▲
	D*	因島東岸に沿って気流が流入	○	○	○	○	○	△
	D	因島東岸に沿って気流が流入	○	○	○	○	○	○
	E	因島南部の山（H=200m, L=2.8km）の後流	△	○	△	△	△	△
	F	因島南部の山（H=170m, L=2km）の後流	△	○	△	△	△	▲
	F*	上述の山及び近傍の山（H=90m, L=300m）の後流	X	X	X	X	X	X
向島側主塔	A*	向島西岸に沿って気流が流入	○	○	○	○	○	△
	A	向島西岸に沿って気流が流入	○	○	○	○	○	○
	B	山（H=90m, L=1km）の後流	△	○	△	△	△	△
	C	山（H=90m, L=1km）の後流	△	○	△	△	△	▲
	C*	近傍の山（H=90m, L=600m）の後流	X	△	X	X	X	X
	D*	向島南部の山により橋軸直交方向へ流入	○	○	○	○	○	△
	D	向島南部の山により橋軸直交方向へ流入	○	○	○	○	○	○
	E	障害地形なし	○	○	○	○	○	○
	F	因島南部の山（H=400m, L=5km）の後流	△	○	△	△	△	△
	F*	因島の山（H=150m, L=2km）の後流	△	○	△	△	△	▲

ここに、各気流特性に及ぼす影響度の欄における記号の意味は、以下のようである。

○：渦励振振動を助長するような影響を受けると考えられる。

X：渦励振振動が抑制されるような影響を受けると考えられる。

△：気流特性に及ぼす影響がほとんど無い、或は、影響因子が多く明確な影響度が定まらない。

また、渦励振に及ぼす影響度の欄における記号の意味は、渦励振領域の風速の風が各風向から作用した時の渦励振の発現可能性を示したものである。

○：渦励振振動の発現可能性が極めて高いと考えられる。

△：○より渦励振振動の発生率は、低いものの振動する可能性が残されている。

▲：ほとんど振動は生じないと考えられるが、稀に振動が生じる可能性もあると考えられる。

X：渦励振振動の発現可能性が極めて低いと考えられる。

推定された渦励振に及ぼす影響度の数値化として、仮に、○印を10、△印を5、▲印を2、そして、X印を0とすると、関門橋の下関側主塔においては、東寄りの風向の合計が12、西寄りが20となり、合計32である。門司側主塔は、東寄りの風向が10、西寄りで27、合計37である。一方、因島大橋主塔は、因島側の合計が59（北寄りの風向において37、南寄り22）、向島側主塔の合計が54（北寄りの風向22、南寄り32）であり、渦励振領域付近の風速が主塔部に作用する上空風の風向別の発現頻度が等しいと仮定した場合、数字上からも因島大橋主塔の渦励振発現の可能性が大きいと判断できる。この推定結果は、前述の実構造物の振動結果と一致しており、構造物の耐風安定性には構造物周辺の地形特性が大きく影響することが示されている。

以上の議論は、構造物に比較的近い地形特性の構造物に及ぼす耐風工学的影響に注目して行なったが、前述のように、広範囲の地形特性（メソスケール）の影響も無視できず、以下に簡単に大規模地形特性の及ぼす影響の一例を紹介する。

下関における台風時の風向風速特性については、第4章において検討し、東西方向（日本海と瀬戸内海を結ぶ方向、関門海峡とほぼ平行な方向）の風向の強風が卓越することを示した。図9-9は、台風来襲時に限らず、15年間（1964-1978年）の全データを用いた下関における解析結果であり、10m/s以上の強風は、北西風も若干存在しているが台風時と同様に東西方向に卓越している。また、関門橋における長期風観測記録の解析結果の一例として、風向別の乱れの強さの分布（平均風速がほぼ主塔の渦励振発現風速に相当する12.5~17.5m/sのデータを用いた解析結果）を図9-10に示す。⁹⁻¹⁰⁾ 下関側主塔及びスパン中央点上において観測された主塔の渦励振領域に相当する風速レベルの風の作用方向は、下関地方気象台と同様に東西方向に集中しており、橋軸直交方向の風がほとんど作用しておらず、関門海峡周辺の大規模な地形特性の影響を大きく受けていることが明らかである。両図より、関門海峡周辺部における卓越風向は、橋軸直交方向と異なっており、この点からも関門橋主塔は、渦励振に対して安定であるといえる。また、下関地方気象台は、図9-8中●印を付した点（関門橋の西南西約3km）であり、図9-9と図9-10の東寄りの強風に注目すると、関門橋上の風向が下関地方気象台における風向と比較して東に偏っている（東北東⇨東）こと、また、下関地方気象台においては、10m/s以上の北西風も作用しているが、関門橋上では観測されておらず、局所的な地形特性によって風況特性が変化することが再確認できる。

WIND ROSE AND MEAN WIND VELOCITY AT SHIMONOSEKI

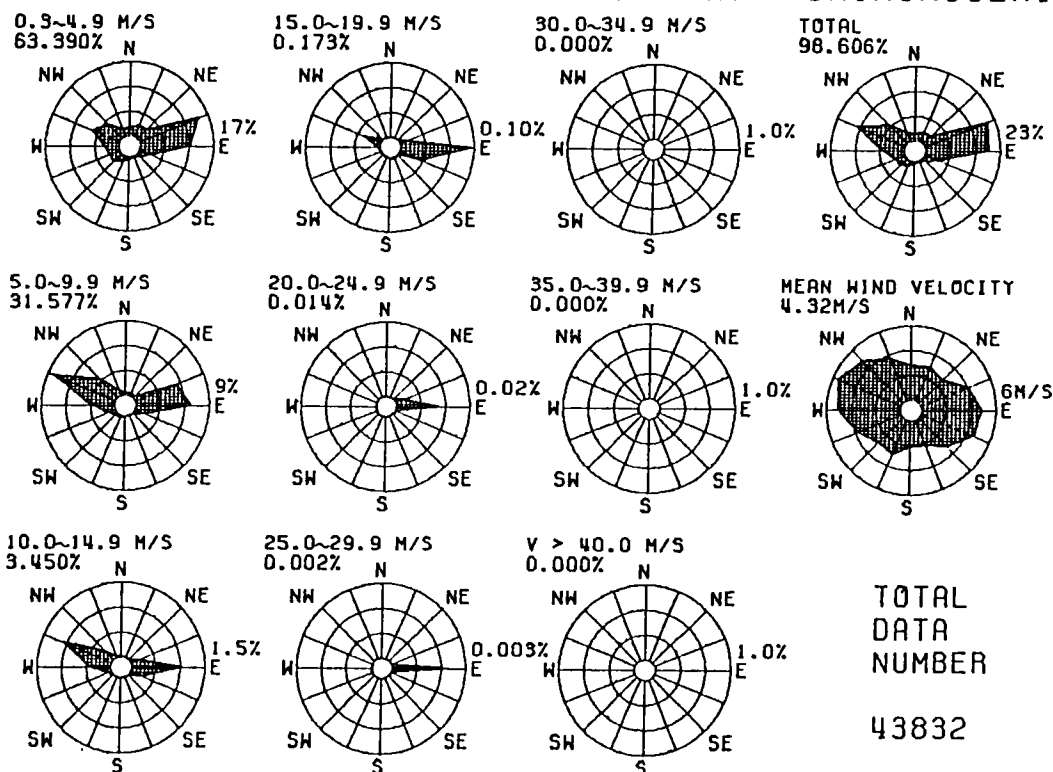
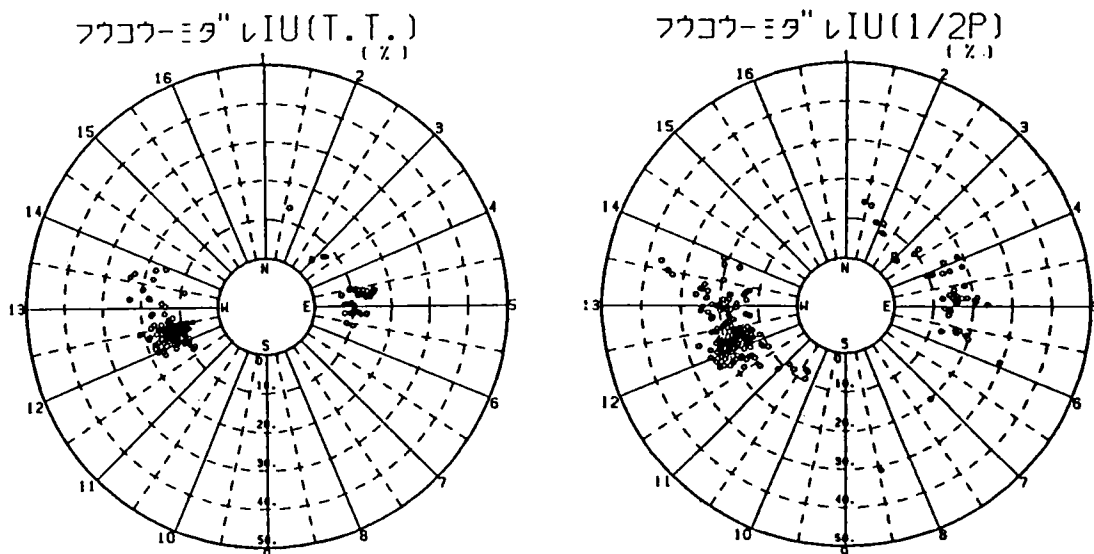


図9-9 下関における15年間(1964-1978年)の風速ランク別風配図



①下関側主塔頂上(超音波風向風速計) ②補剛桁中央径間1/2(超音波風向風速計)

図9-10 関門橋における風向別乱れの強さ(平均風速12.5~17.5m/s)⁹⁻¹⁰⁾

以上のように、吊橋主塔の渦励振を対象として、局所地形並びに大規模地形の構造物に及ぼす耐風工学的影響について検討を加えてきたが、対象構造物は、吊橋主塔に限らず、任意の構造物に対しても、対象構造物と作用する気流特性の対応関係を把握し（矩形断面等の構造基本断面或は、橋梁断面等については、風洞実験等による既往の研究により、作用する気流特性と振動応答特性の対応関係が調査されている。）、気流特性に及ぼす周辺地形の影響を吟味することによって、周辺地形特性の構造物に及ぼす耐風工学的影響の評価が可能である。

また、本節においては、既に完成している構造物を対象として周辺地形特性の構造物に及ぼす耐風工学的影響の推定を試みたが、新たな構造物の計画・調査段階において、周辺地形特性を考慮することによって耐風安定性に優れた建設点の選定或は、建設ルート決定等も可能であると判断できる。

さらに、設計基本風速等の風速マップ図からの各風向別の風速の補正及びガスト応答を支配する乱流特性のより合理的な推定も可能であり、確率・統計論を用いた橋梁の疲労問題の解析精度の向上等耐風設計法の改善にも有効であると考えられる。

9-3 構造物本体の風況特性に及ぼす影響

構造物自身の増速効果による使用性に関して、大型橋梁における走行車輛の安全性について簡単に検討を加える。

長大橋梁の幾何学的形状に起因する気流の増速や攪乱が、走行車輛の安定性に影響を及ぼす例としては、英国のセバン吊橋の事例が良く知られている。この橋は扁平な六角形の箱桁断面で構成され、流線形に近い形状が吊橋の耐風安定性を確保するのに大いに役立っている。ところが、元来この橋の架設地点は強風地域であるのに加えて、橋の断面形状が、さらに気流を増速する効果をもたらすために車輛走行に重大な影響があり、非常にしばしば通行止めとなって不評を買っていると言われている。この種の橋は、耐風設計の観点から容易に防風壁の類を設けることができない為、有効な対策を見出し得ない状態にあると言う。

我国においても、本州四国連絡橋等の長大橋梁が多数建設されており、吊橋、斜張橋については、耐風設計上の立場からは防風壁を設けることは好ましくなく、同様の問題が起こり得ると考えられ、吊橋の代表として大鳴門橋を、また箱桁断面の代表として門崎高架橋を選んで実橋観測と縮尺模型実験を行ない、各桁の断面形状に起因する増速効果を調査した。

9-3-1 橋床周辺部における増速効果

主桁がトラス構造で構成されているとき、橋床面の風に対し、これら構造要素が有意な影響を及ぼすか否かを検証するために風洞実験及び実橋観測を行なった。図9-11は、冬期季節風の作用時（平均風速10～15m/s）における大鳴門橋中央径間淡路側1/4点の実橋路面上の風向風速計測結果である。図中の数字は、上流側高欄外側において高さ5mの位置に設置した熱線風速計によって得られた値を1として規準化した風速値を示す。この結果によれば、上流側走行車線ではほぼ様なレベルの風速であるが、下流側車線では約20%風速が低下している。また、橋床上2mの場合には下流側車線では60%程度の風速に減少していることが判る。さらに、大鳴門橋は、橋梁本体の耐風性の確保のために、中央分離帯を開床とし、その下部にスタビライザーが設けられているが、これらの耐風安定化装置が橋床面風速に悪影響を及ぼすことは無いものと判断できる。

図9-12は、1/100縮尺模型を用いた風洞実験によって得られた橋床面上の風速分布を示したものである。○印は測定点（下から順に1m、2m、3m、5m）であり、水平

の実線の長さが風速を示している。また、 α は迎角であり、 $\alpha = 0^\circ$ は水平に真横から作用する風、 $\alpha = 5^\circ$ は吹き上げ角 5° の風を示している。この結果は大旨実測結果と一致しており、実験の有効性を示すものと考えられる。

ケーブルの設置による影響を調査したのが図9-13である。上段より順にケーブルなし、ケーブルと上弦材の中心間距離2m（スパン中央部）、及び、4mにおける断面周りの風速分布図である。ケーブルに近い測点では、ケーブルの影響が存在しているが、他測点はほとんど影響を受けていない。ただし、実験時のRe数と実橋のRe数は、 10^3 のオーダーで異なり、Re数が一致していないことより、実験値ではケーブルの影響が正しく評価されていない可能性もある。

これらの結果を総合的に判断すると、車高の低い乗用車等はバス、トラック等に比べて作用する空気力が相対的に小さな値となると判断でき、車種別通行規制の妥当性を示唆していると言える。

また、図9-14は、箱桁断面の門崎高架橋における横断面風速分布調査結果を示したものである。⁹⁻¹¹⁾ 門崎高架橋は、比較的中央径間長が短い（約190m）ものの、空力的に非常に不安定な断面であり、制振装置として、ダブルフラップと下部スカートを組み合わせることによって耐風性の改善がなされている。⁹⁻¹²⁾ 縦軸は接近流速（11m/s）からの偏差を示している。耐風安定化装置であるダブルフラップは、2枚の板によって気流をフラップ間或は地覆とフラップ間に強制的に流入させることによって、渦励振等の空力不安定振動の発生を抑制していることが風速分布から明らかであり、フラップ直後の測点において、フラップによる強制流入気流のために接近流速より若干増速されている。しかし、フラップの影響はフラップの直背後のみであり、断面中央部では通常の路面上の風速分布と大差不いものと考えられる。

9-3-2 主塔周辺部における増速効果

長大吊橋を支える主塔の幅は、橋床面で約7 mであり、横風作用時には渦の発生源となると同時に遮風効果を有するために、主塔部を通過する車輛は急激な風速変化に見舞われて走行に支障を生じる可能性がある。この問題を検討するために、前項と同様に実橋観測及び1/100縮尺模型による風洞実験を行なった。

図9-15は実橋観測の結果である。図中の矢印はその地点での風向と風速の大きさを示すものであり、風速は数値でも示されている。各風速値は塔から十分離れた位置での

桁上流端での風速によって規準化されている。主風向が特定できないが、塔の背後は完全に後流内にあって風速がほぼゼロに近いのに対し、後流部から離れると基準風速のレベルに回復し、一部では増速する傾向も認められる。

図9-16、図9-17は、橋軸直角方向並びに水平偏角が 25° の風を水平に受ける場合の風洞実験結果の一例である。実橋観測と類似した風速分布を示し、塔部で剥離した流れが増速して基準風速より10%以上上昇していることが判る。

主塔の効果としてはこの他に、剥離した渦による車輛への動的な影響も存在し、その一例として、主塔後流中を通過する車輛に作用する突風空気力を風洞実験で求めた結果を図9-18に示す。⁹⁻¹³⁾ 実験では車輛の代りに矩形断面を用いているので、真に車輛に作用する空気力とは異なるものであるが、主塔の影響を考慮する上で興味深い。主塔幅は車長の2倍程度となっており C_x は横力係数、 C_m はヨーイングモーメント係数であり車輛に作用する回転力を表わす。渦の発生を抑えた場合、静止車輛（点線）と走行車輛では作用空気力に大差はなく、主塔背後突入寸前に若干増加した横力が、背後突入直後に最小値を取っていることから、作用空気力の急激な変化が生じていることが判る。また、渦の発生を許した場合には発生する渦の周期に合わせて、作用空気力が変化していること、その場合渦の周期と車輛の位置の関係によって、最大空気力が変化すること（図（a）の実線1と実線2は（c）図に示すような、逆位相の渦による空気力の変化を表わす。）等がわかる。このように細かな変動をも含めた作用空気力の急変に対して、運転者が急激なハンドル操作で応じる場合、不測の事故につながる危険性があることになる。

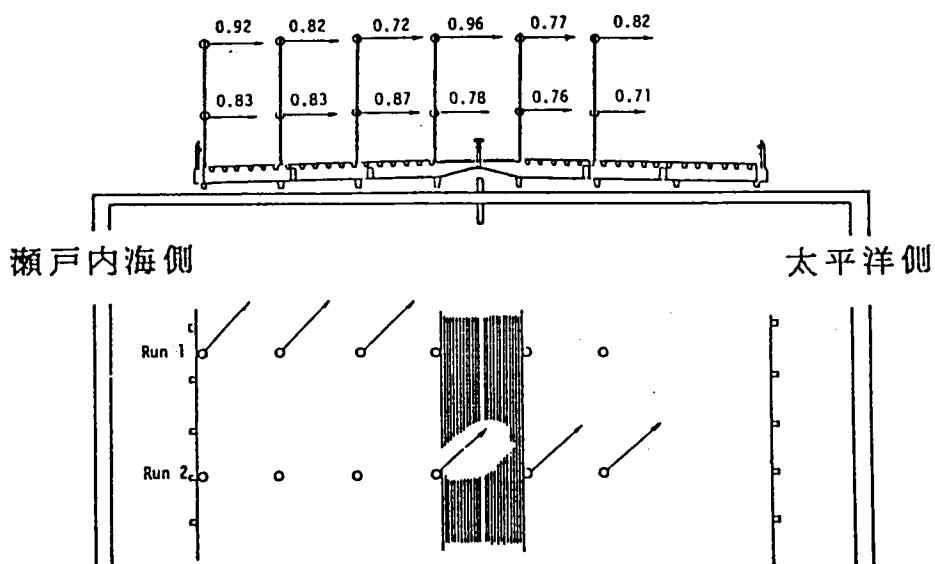


図 9 - 11 ②大鳴門橋横断方向風向風速分布 (昭和60年 1 月28日)

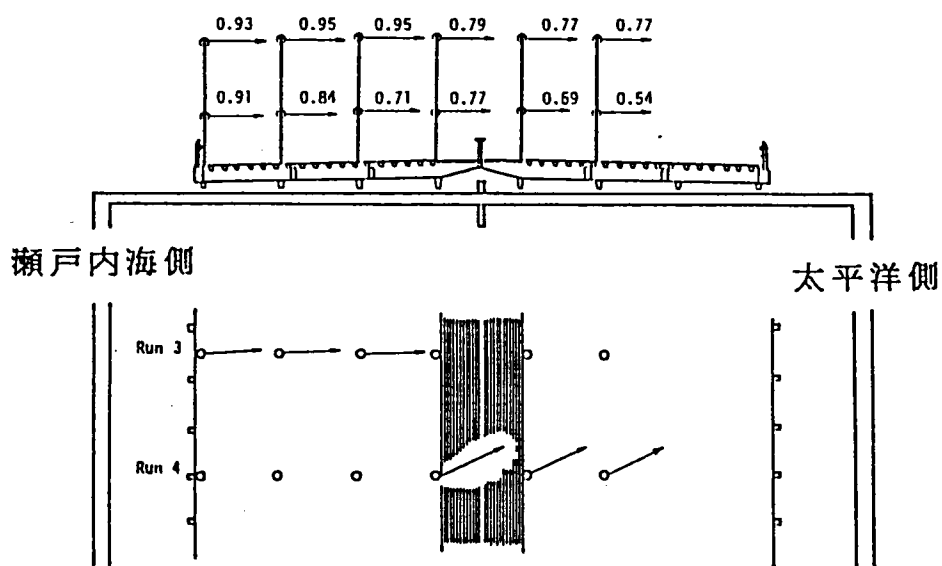
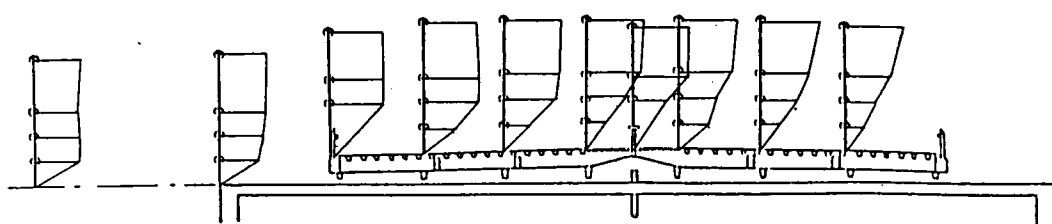
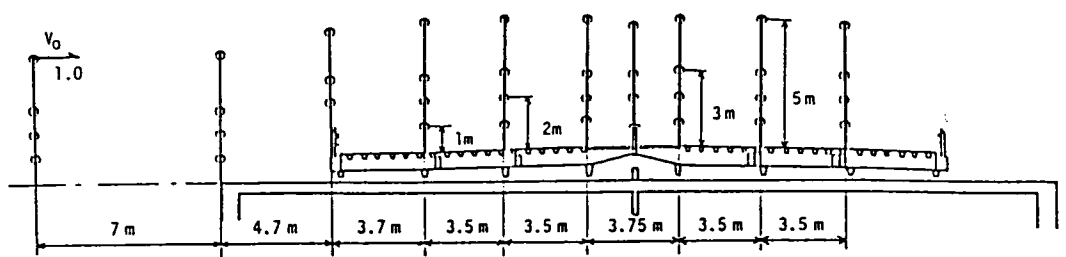
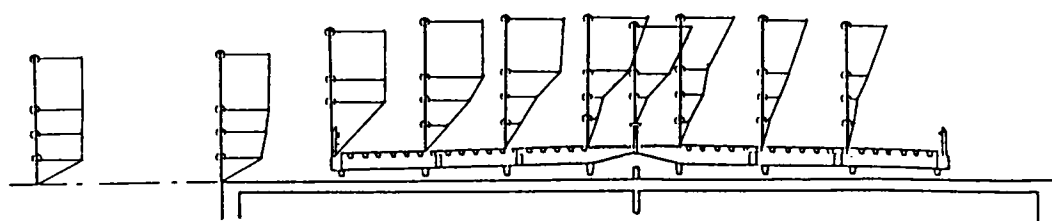


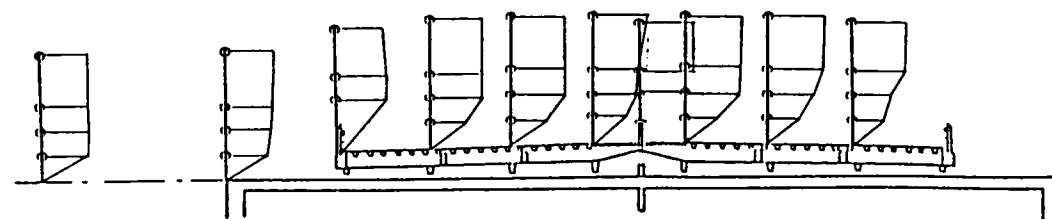
図 9 - 11 ③大鳴門橋横断方向風向風速分布 (昭和60年 1 月29日)



(a) $\alpha = 0^\circ$



(b) $\alpha = +5^\circ$



(c) $\alpha = -5^\circ$

図 9-12 大鳴門橋横断面風速分布 (風洞実験、 $S=1/100$ 、一樣流、 $V=2.5\text{m/s}$)

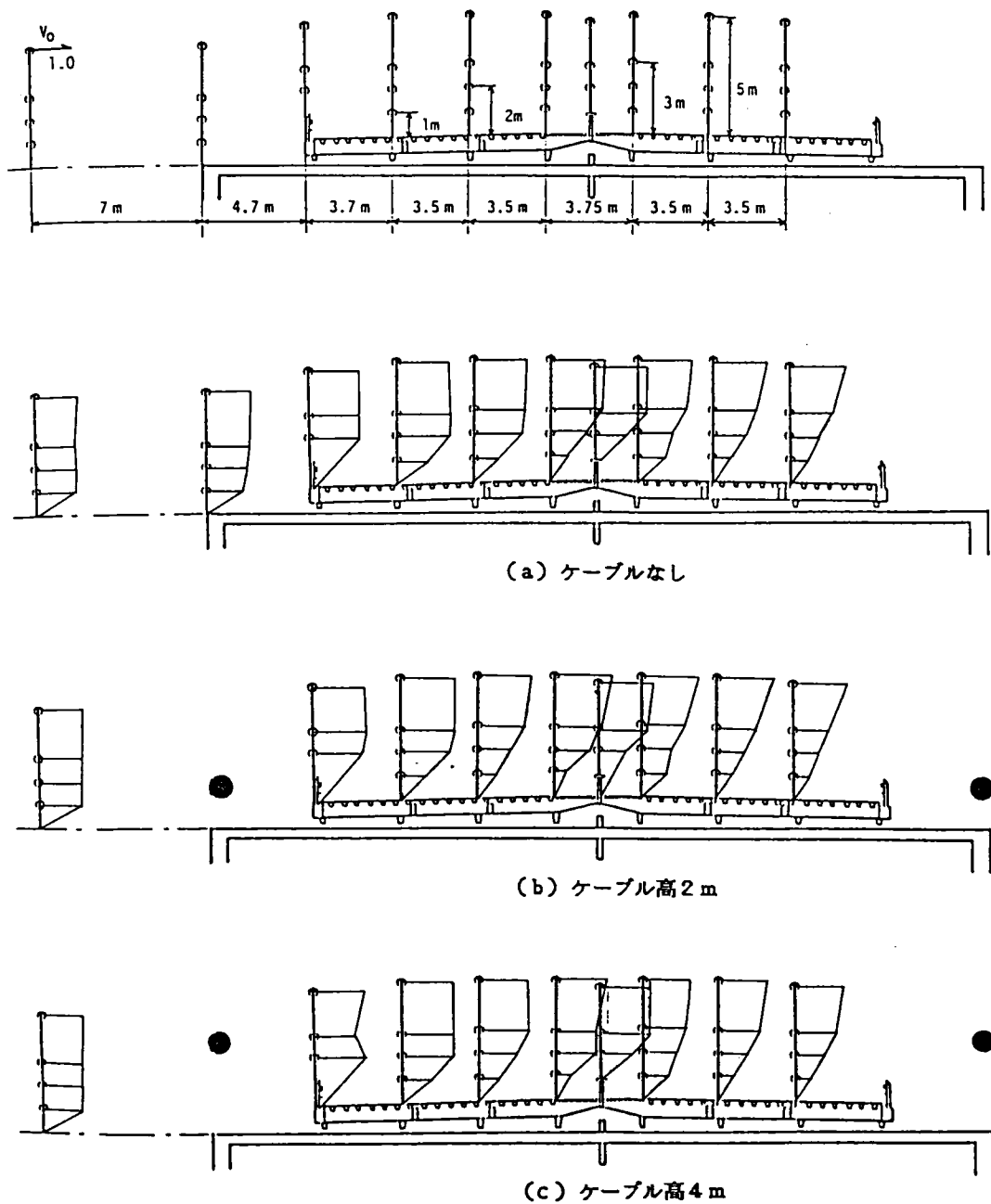


図9-13 ケーブルの横断面風速分布に及ぼす影響
(風洞実験、 $S=1/100$ 、一様流、 $V=2.5\text{m/s}$)

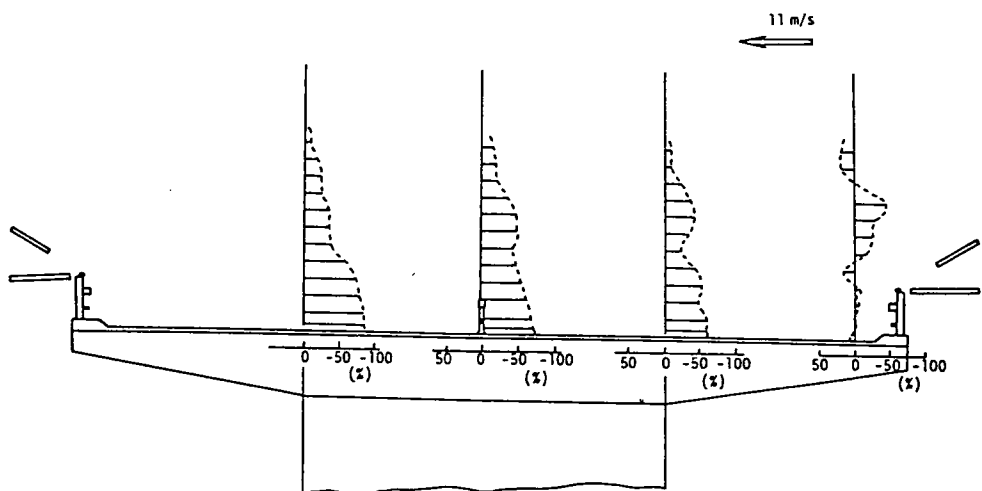


図 9-14 門崎高架橋横断面風速分布（推定接近流速からの偏差）⁹⁻¹¹⁾

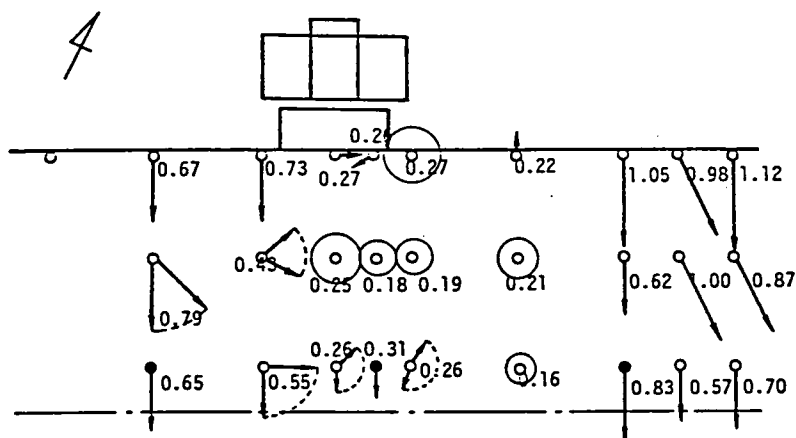


図 9-15 ㊸大鳴門橋主塔部風向風速分布（昭和60年1月28日、風向NNW-NW）

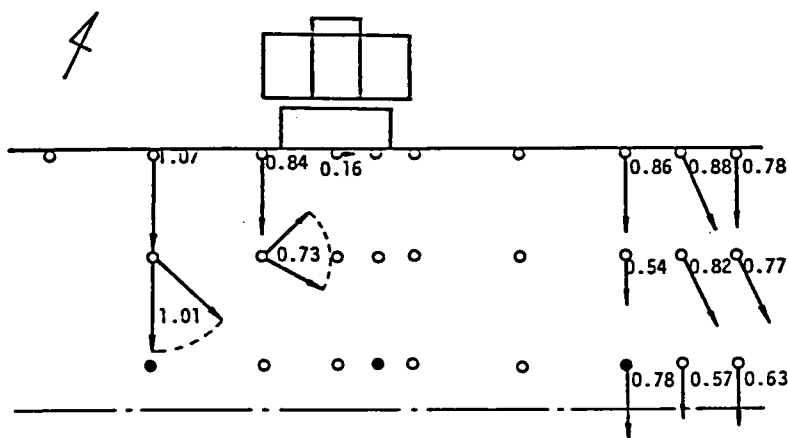


図 9-15 ㊹大鳴門橋主塔部風向風速分布（昭和60年1月29日、風向NNW-NW）

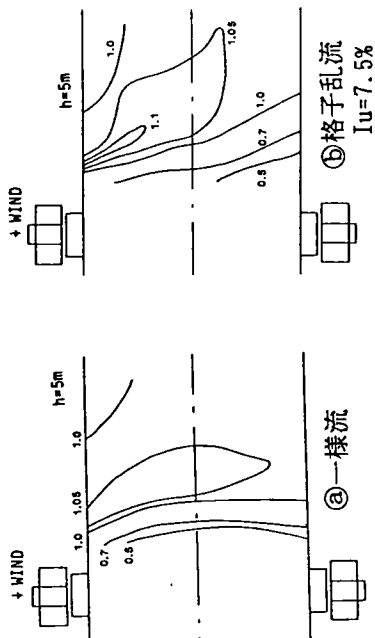


図 9-16 大鳴門橋主塔部風速分布
(風洞実験、 $V=2.5\text{m/s}$ 、 $\beta=0^\circ$)

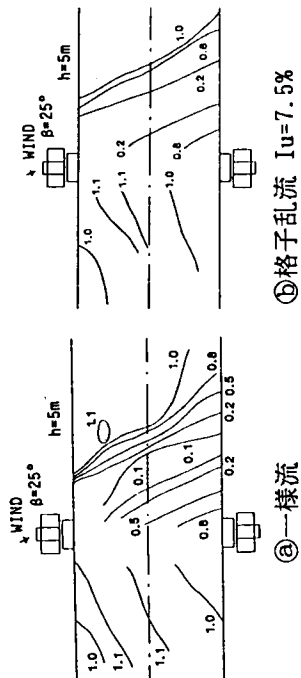
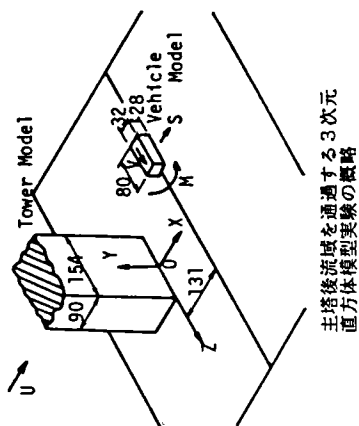


図 9-17 大鳴門橋主塔部風速分布
(風洞実験、 $V=2.5\text{m/s}$ 、 $\beta=25^\circ$)



主塔後流域を通過する3次元
直方体模型実験の概略

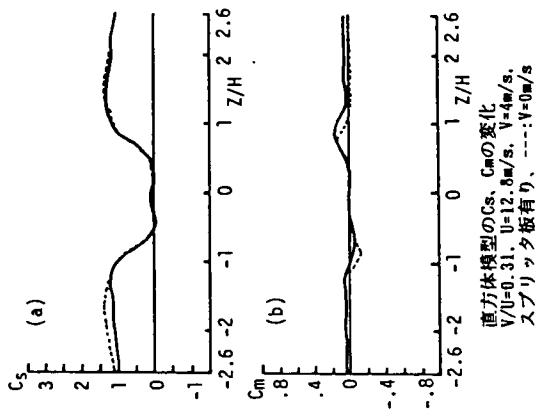
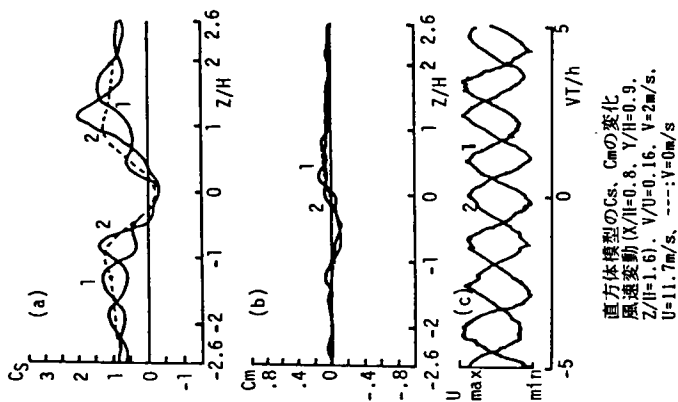


図 9-18 主塔背後通過時に車輛に作用する空気の測定結果
(風洞実験) 9-13)



直方体模型の C_s 、 C_m の変化
風速変動 ($X/H=0.8$ 、 $Y/H=0.9$ 、 $Z/H=1.6$)、 $V/U=0.16$ 、 $V=2\text{m/s}$ 、 $U=11.7\text{m/s}$ 、---: $V=0\text{m/s}$

9-4 結言

本章においては、前章までに検討を加えてきた地形特性の風況に及ぼす影響度を参照することにより、構造物の耐風性に及ぼす構造物周辺地形の影響について検討したものであり、本章において得られた結果を要約すると以下のものである。

まず、構造物周辺地形の構造物に及ぼす耐風工学的影響を評価する手法として、本研究では、従来より研究されてきている構造物の応答特性と気流特性の対応関係を利用して、各風向毎に構造物の建設点と周辺地形の相対的な位置関係から周辺気流特性を前章までに検討した各地形特性の周辺気流特性に及ぼす影響を用いて検討することにより、間接的に推定することを提案した。そして、構造物周辺地形特性の構造物に及ぼす耐風工学的影響に関する本推定手法の妥当性については、関門橋と因島大橋の主塔の渦励振応答を具体的検証例として検討した結果、実際に渦励振の生じた因島大橋の主塔部においては、関門橋の主塔部と比較して渦励振が発生し易い風況特性が周辺地形によって形成されていることが明らかとなり、本推定法の有効性が示された。

本推定法を建設計画中の構造物に適用することによって、構造物周辺地形の耐風工学的影響を明らかにでき、耐風安定性に優れた建設地点・建設ルートを選定が可能である。

さらに、周辺地形の耐風工学的影響の大きい動的不安定現象または、逆に、地形特性によって振動現象が安定化すること等を事前に予測することによって、より合理的な構造物の耐風設計が可能であると考えられる。また、設計基本風速或は地形因子解析等によって得られた再現期待風速等の風速マップ値の各風向毎の補正等にも応用できるものと考えられる。

また、本章においては、構造物自身の風況特性に及ぼす影響として、構造物の使用性と関連して風速の増速効果についても若干の考察を加えた結果、構造物本体の耐風性の向上のために付加された耐風安定化装置（フラップ、グレーティング、スタビライザー等）は極めて局所的な増速効果を有するものの、使用性（走行車両の安定性）には問題ないことが明らかとなった。また、大鳴門橋の主塔付近における現地観測並びに風洞実験結果等より、長大吊橋の主塔付近は、人工的な突風の作用点となる可能性があり、運転者に注意を喚起する必要があるだろう。

第10章 結論

本研究は、構造物周辺の複雑な地形特性が構造物の耐風性或は構造物の耐風設計の基本量となる設計風速等に及ぼす耐風工学的影響を明らかにし、その評価法を確立することを目的として実施されたものであり、本研究によって、得られた結論と今後の課題について簡単に要約すると以下のようである。

まず、第3章においては、気象官署の風向別風速データを使用し、対象地点周辺の地形特性が強風特性に及ぼす影響を重回帰分析を用いて調査・検討した結果、本研究で新たに提案された局所的地形因子である‘丘度’及び従来よりよく使用されている海度・起伏度等が、比較的重要な因子であることが明かとなった。また、日本全土の風向別最大風速を一律に支配する地形因子の抽出は不可能であったが、推定精度の悪い測点（過大評価測点、過小評価測点）を対象として再解析を施すと、推定精度が大幅に向上することから、これらの測点においては強風特性に影響を及ぼす地形特性に強い相関性があると考えられる。しかし、測点間の共通特性を検出するには至っておらず今後の課題として残されている。さらに、西日本においては、台風の影響を大きく受けること、並びに、風向によっては、局所的なミクロスケールの地形特性の影響も無視できないことが確認され、この2点について、以下の各章においてさらに詳細な検討を加えた。

第4章では、台風による西日本各地の強風特性と周辺地形特性の対応関係に注目し、特に、台風の位置と経路の強風特性に及ぼす影響を検討した。その結果、台風の位置・経路は、強風の作用方向、強風継続時間、及び、風速の強さ等を支配する大きな要因であることが判明した。また、大規模（メソスケール）な地形特性に支配された卓越風向を有する地点（瀬戸内海と外洋の境界地点、瀬戸内海へ吹込む風或はその逆に外洋に吹抜ける風が卓越し、この卓越風向の強風の発現頻度も高くなる。）が存在することも確認され、台風による強風特性にも、周辺地形特性並びに大規模な地形の及ぼす影響が大きいことが明らかとなった。

局所地形が風速増速効果等の風況特性に及ぼす影響を、第5章において、長大橋梁が建設されている海峡周辺部（大鳴門橋並びに瀬戸大橋周辺部）を対象とした縮尺地形模型実験及び現地強風観測によって調査した結果、丘、上流の島（山）、谷、半島等の局所地形の風況特性に及ぼす定性的な傾向が明らかとなった。しかし、各局所地形の風況特性に及ぼす影響の定量的評価式の作成には、複雑な地形を単純化し、風況を支配する地形因子

を抽出し、その影響を詳細に調査・検討する必要がある。本研究においては、局所地形として、丘状地形（第6章）、谷及び切通し状地形（第7章）、及び、半島状地形（第8章）に注目し、単純化地形模型を用いた風洞実験によって、風況特性に及ぼす局所地形の影響を調査した。さらに、実際の類似地形の縮尺地形模型を用いた風洞実験・現地強風調査によって単純化地形模型実験において得られた特性を確認している。

まず、丘状地形に対しては、地形特性が比較的単純なことから、従来より風況特性に及ぼす地形特性の影響が調査・検討されており、風速増速率に関する推定式も2・3提案されている。しかし、これらの推定式は、丘頂上部から剥離の生じない穏やかな斜面勾配の丘を対象としており、我国のような急峻な丘への適用性には問題があると考えられ、急峻な丘を対象として、斜面勾配と増速率の対応関係並びに既存の推定式の適用性について検討を加えた。その結果、斜面勾配の増加と共に増速率は増加するが、ある限界斜面勾配以上の丘においては、逆に増速率は低下することが明かとなった。そこで、より合理的な風速推定として、限界斜面勾配以上の急勾配斜面の丘に対する補正式を提案（斜面勾配を従来のように一定とせず、斜面勾配の関数として評価した。）し、推定精度の向上が得られることを確認したが、複雑な地形における気流の作用方向の決定手法、丘と傾斜した方向から作用する気流に対する増速効果、及び、複雑な丘のモデル化方法等、今後の検討課題も多く残されている。

次に、谷状地形に関する検討例がほとんどないことより、第一ステップとして、風洞内に台地状地形の中央部に直線状の平行且つ水平な谷を設定し、谷の長さ（ L/H ）、谷幅（ W/H ）、及び、台地状地形の上流側斜面勾配（ ψ ）の谷状地形周辺の風況特性に及ぼす効果を調査した。その結果、谷中心軸上においては、谷の深さ（ H ）が一定となる部分において最も増速され、谷の深さの6～10程度の下流部において、ほぼ定常な流れとなり、増速率は、谷幅の減少、及び、台地状地形の上流側斜面勾配の増加に伴なって、大きくなることが明かとなった。また、計測高さ（ z/H ）が低くなるほど増速率が大きくなり、丘状地形における測定高さの効果と同様な傾向が得られている。谷の長さが短くなると、谷入口付近の増速率は変化しないものの、谷の内部の風速は抵抗が小さくなることに対応して増速する。なお、谷中心軸上の増速率より、谷の斜面上の増速率が大きくなり、さらに、上流側の谷入口部の稜線上における増速率が気流の収束効果によって最も大きくなることも明かとなった。

また、尾根の中心部に切通しを有する地形の風況特性は、谷状地形における特性と類似

しており、開口幅 (W/H)、法面勾配 (ψ) の及ぼす影響が大きく、開口部の斜面勾配 (θ) は、尾根の直背後の気流の巻込み現象に影響を及ぼすに過ぎない。また、底面を同一とし、尾根の高さ H を変化させた模型による調査では、切通しに流入する流量及び尾根からの剥離の強さ等が異なり、増速率、増速域にも差が生じ、このようなひずみ模型の適用性として、定性的な流れの把握、相対的な風況変化の予測等が挙げられるが、定量的な調査には問題があることが示されている。

そして、複雑な谷及び切通し状地形の風況特性を縮尺地形模型を用いて調査した結果、地形形状が複雑なことより定量的な評価はできていないが、定性的には、単純化地形模型実験結果と一致した風況特性であることが確認できた。定量的な増速効果の評価には、地形因子の及ぼす効果をより詳細に検討すると共に、各地形因子が複雑に組み合わさった場合の増速効果を把握することが必要不可欠である。また、現地強風観測結果は、風洞実験における風向と一致した風が作用するときには、良い対応関係を示し、縮尺地形模型実験の妥当性が確認できた。

また、半島状地形周辺の強風特性を調査した結果、条件さえ整えば（風向・半島の断面形状）、通常は、半島の後流に位置し弱風が作用する半島の背後において接近流速の2倍或は、上空風速以上の強風が地表面付近に作用することが明らかとなった。そして、この強風現象の発生状況は、尾根の先端部周辺部から尾根の背後（負圧領域）に気流が巻込み、渦を形成し、渦が接近風の作用方向と尾根の成す角の中間的な方向に流下し、渦の回転半径が小さく気流が著しく収束する地表面付近において、渦の回転方向に非常に大きな風速が作用することが判明した。この現象は、尾根の形状と作用する風向に大きく依存することも確認され、強風の発生を支配する地形因子は、尾根下流側法面勾配（尾根前縁から強風出現領域までの距離と風速の強さ）、尾根の上流側法面勾配並びに尾根前縁部の勾配（平野部で観測される風の増速率）、及び、尾根の高さ（強風出現領域とその出現高さ）であることが明らかとなった。また、第7章において検討した切通し状地形に気流が傾斜して作用する場合にも、条件さえ整えば単独の半島状地形における強風現象と同一の極めて局所的な強風現象が発生することも示された。さらに、この強風特性の特徴として、気流が回転しながら作用することによって、非常に大きく増速される地点においても乱れが大きいことが挙げられる。なお、2次元丘、谷及び切通し状地形においては、増速される地点の乱れは小さく、減速域で乱れが強くなることが確認されている。

最後に、第9章において、構造物周辺地形の構造物に及ぼす耐風工学的影響の評価方法として、本論文で得られた局所地形の風況特性に及ぼす影響調査結果を適用する方法を提案し、関門橋と因島大橋の主塔の渦励振に及ぼす周辺地形の耐風工学的影響の推定を試みた。その結果、実際に渦励振応答の生じた因島大橋周辺部の局所地形は、渦励振が発生しなかった関門橋周辺部の局所地形の及ぼす耐風工学的影響と比較して、定性的ではあるものの、渦励振振動を助長する風況特性を形成する効果を有することが明らかとなり、本評価法の妥当性が示された。また、本評価法を計画中の構造物に適用することにより、周辺地形の耐風工学的影響が評価され、耐風安定性に優れた建設地点・ルートを選定が可能になるとともに、特に検討すべき構造物の動的振動現象が予め予測でき、より合理的な構造物の耐風設計が可能になると考えられる。さらに、各種の風速マップの各風向毎に局所地形の影響を考慮した風速補正等にも応用できるものと考えられる。本評価法によって、複雑な局所地形の耐風工学的影響をより精度よく推定するためには、複雑な地形状態の適切なモデル化、前述の局所地形の風況特性に及ぼす効果をより精度よく評価すること、及び、複合した地形因子の及ぼす影響の正確な評価、さらに、大規模な地形特性の及ぼす風況特性の評価等が必要であり、残された問題点も多数ある。

また、構造物本体の及ぼす増速効果について長大橋梁を対象として検討を加えた結果、橋梁桁断面に施された耐風安定化施設は、極めて局所的な増速効果を及ぼすに過ぎず、使用性には問題がないことが確認された。長大吊橋の主塔周辺部は、人工的な突風発生源となる可能性があり、走行車輛に及ぼす影響を詳細に検討する必要があると考えられる。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、終始暖かく御指導下さいました京都大学教授白石成人博士に心から感謝致します。同時に、著者が徳島大学4回生より風工学を学び始めて以来、変わらぬ御指導を頂いている徳島大学教授宇都宮英彦博士、並びに、京都大学博士課程の3年間のみならず徳島大学に勤務した後も御指導・お励まし下さいました京都大学助教授松本勝博士に深く感謝致します。そして、学生時代より、数々のご助言を頂くと共にお励まし下さいました徳島大学助教授澤田勉博士、並びに、京都大学講師古田均博士に御礼申し上げます。

また、大鳴門橋及びその取付け道路における現地観測の機会を頂いた本州四国連絡橋公団第1建設局鳴門工事事務所の関係各位に厚く御礼申し上げます。

さらに、実験・解析の遂行にあたり御協力を頂きました京都大学橋梁研究室の諸氏並びに徳島大学土木設計学研究室の卒業生諸氏に感謝致します。

最後に、実験・図面作成等に御援助頂きました徳島大学宗田和之技官に御礼申し上げます。

参考文献

第1章

- 1-1) 松本 勝：構造物の設計：風荷重，データ処理と確立統計マニュアル，昭和57年度土木学会関西支部講習会テキスト，pp. 53-56，1982.
- 1-2) Hunt, J. C. R. ; Wind over Hills, American Meteor. Soc., pp. 107-146, 1980.
- 1-3) Milne-Thompson, L. M. ; Theoretical Hydrorynamics, 4th Ed., Macmillan, 1960.
- 1-4) Jacckson, P. S. and Hunt, J. C. R. ; Turbulent Wind over a Low Hill, Quart. J. R. Met. Soc., 101, pp. 929-955, 1975.
- 1-5) Bradley E. F. ; An Experimental study of the Profiles of Wind Speed and Turbulence at the Crest of a Large Hill, Quart. J. R. Met. Soc., 106, pp. 101-123, 1980.
- 1-6) Bowen, A. J. ; The Prediction of Mean Wind Speeds above Simple 2D hill Shapes, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 15, pp. 259-270, 1983.
- 1-7) Bowen, A. J. and Lindley, D. : A Wind-Tunnel Investigation of the Wind Speed and Turbulence Characteristics Close to the Ground over Various Escarpment Shapes, Bowndary-layer Meteor., 12, pp. 259-271, 1977.
- 1-8) Pearse, J. R., Lindley, D. and Stevenson D. C. : Wind Flow over Ridges in Simulated Atmospheric Boundary Layers, Bowndary-layer Meteor., 21, pp. 77-92, 1981.
- 1-9) 藤本盛久，大熊武司他：風の流況に及ぼす地表面粗度ならびに地形の影響に関する基礎的研究，第6回風工学シンポジウム，pp. 45-52, 1980.
- 1-10) Britter, R. E., Hunt, J. C. R. and Richards, K. J. ; Air Flows over a Two-Dimensional Hill, Studies of Velocity Speed-up, Roughness Effects and Turbulence, Quart. J. R. Met. Soc., 107, pp. 91-110, 1981.
- 1-11) Alexander, A. J. and Coles, C. F. ; A Theoretical Study of Wind Flow over Hills, 3rd Int. Congress on Wind Loads on Buildings and Structures, Tokyo, pp. 95-103, 1971.
- 1-12) Taylor, P. A. ; Some Numerical Studies of Surface Boundary-Layer Flow above Gentle Topography, Boundary Layer Meteor., Vol. 11, pp. 439-465, 1977.

- 1-13) Deaves, D. M. ; Computations of Wind Flow over Two-Dimensional Hills and Embankments, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 6, pp. 89-111, 1980.
- 1-14) Yeung, P. K. and Kot S. C. ; Computation of Turbulent Flow past Arbitrary Two-Dimensional Surface-Mounted Obstructions, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 18, pp. 177-190, 1985.
- 1-15) Bergeles, G. C. ; Numerical Calculation of Turbulent Flow around Two-Dimensional Hills, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 21, pp. 307-321, 1985.
- 1-16) Mason, P. J. and Sykes, R. I. ; Flow Over an Isolated Hill of Moderate Slope Quart. J. R. Met. Soc., 105, pp. 383-395, 1979.
- 1-17) Teunissen, H. W. ; Wind-Tunnel and Full-Scale Comparisons of Mean Wind Flow over an Isolated Low Hill, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 15, pp.271-286, 1983.
- 1-18) Teunissen, H. W. and Taylor, P. A. ; The Askervein Project : Full-Scale Measurements and Model Comparisons of Wind Flow Over an Isolated Hill, Proc. 5th U.S. Nat. Conf. on Wind Eng., 1985.
- 1-19) Teunissen, H. W. and Shokr, M. E. ; Wind-Tunnel / Full-Scale Comparisons of Boundary-Layer Flow over Askervein Hill, Scotland, Asia Pacific Symp. on Wind Eng., India, pp. 87-94, 1986.
- 1-20) Verma, S. B. and Cermak, J. E. ; Wind Tunnel Investigation of Mass Transfer from Soil Corrugations, J. Appl. Meteor., Vol. 13, pp. 578-587, 1974.
- 1-21) Counihan, J. ; Flow over Concatenated Sinusoidal Hills, Central Elec. Res. Lab., (England) Report RD/L/N57/74, 1974.
- 1-22) ESDU ; Wind Speeds and Turbulence, Vol. 1 a, b , ESDU, 1986.
- 1-23) Cook, N. J. ; The Designer's Guide to Wind Loading of Building Structures, Part 1. London, Butterworths, pp.138-162, 1985.
- 1-24) Lemelin, D. R., Surry, D. and Davenport, A. G. ; Simple Approximations for Wind Speed up over Hills, Proc. 7th. Int. Conf. on Wind Eng.,Aachen, Vol. 1, pp. 201-211, 1987.
- 1-25) Deaves, D. M. and Harris, R. I. ; The Mathematical Model of the Structure of Strong Winds, Construct. Ind. Res. Inf. Assoc., Rep. 76, 1978.
- 1-26) Deaves, D. M. ; Computations of Wind Flow over Changes in Surface Roughness,

- J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 7, pp. 65-94, 1981.
- 1-27) Baker, C. J., Wood, C.J. and Gawthorpe, R. G. : Strong Wind in Complicated Hilly Terrain - Field Measurements and Wind-Tunnel Study, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 18, pp. 1-26, 1985.
- 1-28) Baker, C. J. : Determination of Topographical Exposure Factors in Complicated Hilly Terrain, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 17, pp. 239-249, 1985
- 1-29) Baker, C. J. : The Determination of Topographical Exposure Factors for Railway Embankments, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 21, pp. 89-99, 1985.
- 1-30) Thompson, R. S. and Snyder, W. H. : Air Pollution and Terrain Aerodynamics : A Review of Fluid Modeling Studies at the EPA Fluid Modeling Facility, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 21, pp. 1-19, 1985.
- 1-31) Brighton, P. W. M. : Strongly Stratified Flow Past Three-Dimensional Obstacles, Quart. J. Roy. Met. Soc., 104, pp. 289-307, 1978.
- 1-32) Ogawa, Y., Diosey, P. G., Uehara, K. and Ueda, H. : Plume Behavior in Stratified Flows, Atmospheric Environment, 16, pp.1419-1433, 1982.
- 1-33) Corby, G. A. : The Airflow over Mountain, A Review of the State of Current Knowledge, Quart. J. Roy. Met. Soc., 80, pp. 491-521, 1954.
- 1-34) Alaka, M. A. (ed) : The Airflow over Mountains, WMO Tech. Note, No. 34, pp. 135, 1960.
- 1-35) Long, R. R. : Laboratory Model Resembling the "Bishop Wave" Phenomena, Bull. Amer. Met. Soc., 34, pp. 205-211, 1953.
- 1-36) 荒川正一 : 日高しも風の調査, 研究時報, 12, pp. 919-919, 1960.
- 1-37) Arakawa, S. : Climatological and Dynamical Studies on the Local Strong Winds, Mainly in Hokkaido, Japan, Geophy. Magazine, 34, pp. 359-425, 1969.
- 1-38) 小野田仁, 山下旭 : 北海道南西岸寿都沖の強風帯, 研究時報, 37, pp. 223-230, 1985.
- 1-39) 竹内衛夫 : 清川ダシについて, 研究時報, 36巻別冊, pp. 42-43, 1985.
- 1-40) 宇田川和夫 : 松本の南風の発生機構について, 研究時報, 18巻, pp. 338-352, 1966.
- 1-41) 児玉良三 : 伊吹山頂のSE風と地上の風との関係, 研究時報, 36巻別冊, pp. 126-127, 1985.

- 1-42) 大谷東平：貧乏神と呼ばれる”おろし”，天気，3，pp.65，1956.
- 1-43) 和達清夫：日本の気候 Climate of Japan，東京堂，1958.
- 1-44) 中田隆一：肱川あらしの調査，研究時報，34巻，pp. 135-139，1982.
- 1-45) 河村武：中部日本の局地風について，構造物の耐風性に関する第4回シンポジウム論文集，pp. 1-6，1976.
- 1-46) 荒川正一：おろし風を中心とした山越え気流論，気象研究ノート，125号，pp. 115-148，1975.
- 1-47) Houghton, D. and Kasahara, A. :Nonlinear Shallow Fluid Flow over an Isolated Ridge, Comm. Pure. and Appl. Math., 26, pp. 1-23, 1968.
- 1-48) 相馬清二：地形性強風について（気流の収束と剥離），構造物の耐風性に関する第1回シンポジウム論文集，pp. 1-10，1970.
- 1-49) 塩谷正雄：地物・小地形と風，天気，34，No. 8，pp. 3-18，1987
- 1-50) 森征洋，光田寧：鳴門海峡付近の風の特性の実験的研究，構造物の耐風性に関する第3回シンポジウム論文集，pp. 45-52，1974.
- 1-51) Mitsuta, Y. ; Characteristics of Airflow over the Barriers in the Storm, Proc. 3rd Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, pp. 1-12, 1971.
- 1-52) 藤谷徳之助，花房龍男，相馬清二：海峡における風の特性の実験的研究，構造物の耐風性に関する第4回シンポジウム論文集，pp. 45-52，1976.
- 1-53) 本州四国連絡橋公団第2建設局：気象海象記録の整理解析，1986.
- 1-54) 本州四国連絡橋公団第2建設局坂出工事事務所：児島・坂出ルート全域風観測調査報告書，1987.
- 1-55) 宇都宮英彦，長尾文明，齊藤裕二：瀬戸大橋周辺部の強風特性，第40回土木学会中国四国支部研究講演概要集，pp. 68-69，1988.
- 1-56) 宇都宮英彦，長尾文明，矢野雄二：大鳴門橋周辺の強風特性について，第40回土木学会年次学術講演会概要集，Vol. 1, pp. 413-414，1985.
- 1-57) 相馬清二：自動車の強風事故について，第7回風工学シンポジウム論文集，pp. 51-58，1982.
- 1-58) 相馬清二：強風による自動車事故について，日本風工学会誌，15，pp. 1-10，1983.
- 1-59) 宇都宮英彦，長尾文明，平岡盾樹：局所風況の推定に関する基礎的研究，第9回風工

- 学シンポジウム論文集, pp. 49-54, 1986.
- 1-60) Utsunomiya, H., Nagao, F. and Yoshimura, S. ; Wind Tunnel and Full Scale Comparisons on the Change of Local Wind Characteristics due to an Opencut, Proc. 7th. Int. Conf. on Wind Eng..Aachen, Vol. 1, pp. 179-188, 1987.
- 1-61) Utsunomiya, H., Nagao, F. and Hiraoka, T. ; Effects of Topographic Factors on Local Wind Properties, Natural Disaster Science, Vol. 9, No. 2, pp. 77-95 1987.
- 1-62) 宇都宮英彦, 長尾文明, 斉藤裕二 ; 局所風況と地形因子に関する実験的研究, 第10回風工学シンポジウム論文集, pp. 19-24, 1988.
- 1-63) Cook, N. J., Coulson, B.H. and Mckay, W. ; Wind Conditions around the Rock of Gibraltar, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 2, pp. 289-309, 1977/1978.
- 1-64) Neal, D. ; The Influence of Model Scale on a Wind-Tunnel Simulation of Complex terrain, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 12, pp. 125-143, 1983.
- 1-65) Neal, D., Stevenson, D. C. and Lindley, D. ; A Wind Tunnel Boundary Simulation of Wind Flow over Complex Terrain : Effect of Terrain and Model Construction, Bowndary-layer Meteor., 21, pp. 271-295, 1981.
- 1-66) (財) 日本建築センター ; 建築物周辺気流の風洞実験法に関する研究報告書, 1984.
- 1-67) 斉藤鍊一他 ; 防風値の図示相関解析ー日本の強風の研究IV, 気象庁研究時報, 11巻, 9号, pp. 775-780, 1959.
- 1-68) 石原健二, 山岸啓利 ; 未観測地点の最大風速の再現期待値について, 構造物の耐風性に関する第3回シンポジウム論文集, pp. 27-33, 1972.
- 1-69) 建設省土木研究所, 日本気象協会東京本部 ; 設計基本風速調査に関する報告書, 1977
- 1-70) 成田信之 ; 日本における強風期待値の分布, 土木技術資料, 20-7, pp.340-345, 1978
- 1-71) 村上周三, 小峯裕巳 ; メッシュデータを用いた地形因子解析法による任意の地点の平均風速の推定方法に関する研究, 第6回風工学シンポジウム論文集, pp. 357-364, 1980.
- 1-72) 白石成人, 松本勝, 他 ; 日本各地の自然強風特性に関する2, 3の考察, 第9回風工学シンポジウム論文集, pp. 43-49, 1986.
- 1-73) 松本勝, 白石成人, 他 ; 風向別強風の極値特性を考慮した橋梁構造物の安全性評価について, 日本風工学会誌, 32, pp. 9-10, 1987.

- 1-74) 宮田利雄, 柳原正浩; 風向別風速分布特性に関する地形因子解析, 第9回風工学シンポジウム論文集, pp. 37-42, 1986.
- 1-75) 小泉俊雄, 羽倉弘人; 強風災害の予測手法に関する研究, 第6回風工学シンポジウム論文集, pp. 1-8, 1980.
- 1-76) 小泉俊雄, 羽倉弘人; 地形解析をもとにした風力分布の推定に関する研究, 日本風工学会誌, 27, pp. 41-63, 1986.

第2章

- 2-1) 日本気象学会; 気象学における流体実験—風洞を中心として—, 気象研究ノート, 第152号, 1985.
- 2-2) 塩谷正雄; 強風の性質, 開発社, 1981.
- 2-3) 岡内功, 伊藤学, 宮田利雄; 耐風構造, 丸善, 1978.
- 2-4) 市街地風研究会編; 市街地風の研究, オーム社, 1978.
- 2-5) Cermak, J. E. ; Physical Modelling of Flow and Dispersion over Complex Terrain, Boundary-layer Meteor., 30, pp. 261-292, 1984.
- 2-6) Nemoto, S. ; Similarity between Natural Wind in the Atmosphere and Model Wind in a Wind Tunnel (I-III), Pap. Met. Geophys. 12.13, No.2, 1961. 1962.
- 2-7) 井上栄一; 地表風の構造, 農業技術研究所報告, A 第2号, 1952.
- 2-8) (財)日本建築センター; 建築物周辺気流の風洞実験法に関する研究報告書, 1984.
- 2-9) 例えば, 佐藤浩; 大気乱流の風洞実験, 飛行機シンポジウム, 1973.
- 2-10) Schon, J. P., & Mery, P.; A Preliminary Study of the Simulation of Natural Atmospheric Boundary Layer Using Air Injection in a Wind Tunnel, Atmospheric Environment, 5, 1971.
- 2-11) Irwin, H. P. A. H. ; Design and Use of Spires for Natural Wind Simulation, LTA-LA-233, NRC, 1979.
- 2-12) Davenport, A. G. ; Rationale for Determining Design Wind Velocities, Proc. A.S.C.E., 86, No.5, pp. 39-68, 1960.
- 2-13) 本州四国連絡橋技術調査委員会; 本州四国連絡橋耐風設計指針(1967) および同解説, 土木学会, pp. 34, 1967

- 2-14) Hinze, J. O. : Turbulence, 2nd Ed. Chap.3, McGraw-Hill, 1975.
- 2-15) Flaga, A. and Wrana, B. : Analysis of Empiric Formulae of Power Spectral Densities of Three Wind Velocity Vector Components, Proc. 7th. Int. Conf. on Wind Eng., Aachen, Vol. 1, pp. 11-20, 1987.

第3章

- 3-1) 気象庁；普通気候観測資料（時日別）（SDPテープ），1961～1984.
- 3-2) 建設省国土地理院；国土数値情報（標高データファイル）
- 3-3) 宮田利雄，柳原正浩；風向別風速分布特性に関する地形因子解析，第9回風工学シンポジウム論文集，pp. 37-42, 1986.
- 3-4) 宇田川和夫；松本の南風の発生機構について，研究時報，18巻，pp. 338-352, 1966.
- 3-5) 杉原保幸，浅井富雄；局地風「松本の南風」について，天気，pp. 475-483, 1977.
- 3-6) 日本気象学会；気象学における流体実験－風洞を中心として－，気象研究ノート，第152号，1985.

第4章

- 4-1) 藤野陽三，伊藤学，酒井利夫；年最大風速記録による設計基本風速の算定に関する研究，土木学会論文報告集，第305号，pp. 23-34, 1981.
- 4-2) 宮田利雄，吉津洋一；風速の成因別再現期待値に関する一評価，第6回風工学シンポジウム論文集，pp. 373-380, 1980.
- 4-3) 松本勝，白石成人，他；強風に対する橋梁構造物の安全性に関する研究，第10回風工学シンポジウム論文集，pp. 331-336, 1988.
- 4-4) Gomes, L. and Vickery, B.J. ; Extreme Wind Speeds in Mixed Wind Climates, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 2, pp. 331-344, 1977/1978.
- 4-5) J.S.S.C. ; Wind Resistant Design Regulations A WORLD LIST 1975, 学術文献普及会, 1975.
- 4-6) 光田寧，藤井健，文字信貴，川平浩二，塚本修；改良された標準計画台風，京都大学防災研究所年報，第21号 B-1, pp. 393-404, 1978.

- 4-7) 牧野稔, 渡壁守正 ; 台風による強風の確率モデルに基づく基準風速図, 日本風工学会誌
第19号, pp.11-20, 1984.
- 4-8) 白石成人, 松本勝, 長尾文明 ; 西日本各地の台風による強風特性, 第8回風工学シン
ポジウム論文集, pp.63-70, 1984.
- 4-9) Mitsuta, Y., Fujii, T. and Kawahira, K. ; Analysis of Typhoon Pressure
Patterns Over Japanese Islands, J. Natural Disaster Science, Vol. 1, No. 1,
pp.3-19, 1979.
- 4-10) 本州四国連絡架橋調査 気象調査 (中間報告, その5) ; 瀬戸内海の気象と海象,
気象庁, 建設省, 1967.

第5章

- 5-1) 岡内功, 宮田利雄, 他 ; 明石海峡大橋の耐風設計に関する考え方, 第10回風工学シン
ポジウム論文集, pp. 271-276, 1988.
- 5-2) 日本道路公団 ; 関門橋工事報告書, 1977.
- 5-3) 相馬清二, 花房龍男 ; 局地風研究のための風洞実験, 構造物の耐風性に関する第3回
シンポジウム論文集, pp. 53-62, 1974.
- 5-4) 本州四国連絡橋公団第2建設局 ; 気象海象記録の整理解析, 1986.
- 5-5) 本州四国連絡橋公団第2建設局坂出工事事務所 ; 児島・坂出ルート全域風観測調査報
告書, 1987.
- 5-6) 高速道路調査会 ; 本州四国連絡道路の交通・維持管理に関する研究報告, 1977.
- 5-7) 森征洋, 光田寧 ; 鳴門海峡付近の風の特性の実験的研究, 構造物の耐風性に関する第
3回シンポジウム論文集, pp. 45-52, 1974.
- 5-8) Nemoto, S. ; Similarity between Natural Wind in the Atmosphere and Model
Wind in a Wind Tunnel (I-III), Pap. Met. Geophys. 12,13, No.2, 1961, 1962.
- 5-9) 例えば, 藤谷徳之助, 花房龍男, 相馬清二 ; 海峡における風の特性の実験的研究,
構造物の耐風性に関する第4回シンポジウム論文集, pp. 45-52, 1976.

第6章

- 6-1) Jacckson, P. S. and Hunt, J. C. R. ; Turbulent Wind over a Low Hill, Quart. J. R. Met. Soc., 101, pp. 929-955, 1975.
- 6-2) ESDU ; Wind Speeds and Turbulence, Vol. 1 a, b , ESDU, 1986.
- 6-3) Lemelin, D. R., Surry, D. and Davenport, A. G. ; Simple Approximations for Wind Speed up over Hills, Proc. 7th. Int. Conf. on Wind Eng., Aachen, Vol. 1, pp. 201-211, 1987.
- 6-4) Cook, N. J. ; The Designer's Guide to Wind Loading of Building Structures, Part 1. London, Butterworths, pp.138-162, 1985.
- 6-5) Pearse, J. R., Lindley, D. and Stevenson D. C. ; Wind Flow over Ridges in Simulated Atmospheric Boundary Layers, Bowndary-layer Meteor., 21, pp. 77-92, 1981.

第7章

- 7-1) 市街地風研究会編：市街地風の研究，オーム社，1978.
- 7-2) 風工学研究所編：ビル風の知識，鹿島出版会
- 7-3) 例えば，吉田正昭，他：新宿新都心地域の風，第8回風工学シンポジウム論文集，pp. 107-114, 1984.
- 7-4) (財)日本建築センター：建築物周辺気流の風洞実験法に関する研究報告書，1984.
- 7-5) 田中輝彦，長谷美達雄，他：河川横断の送電線に対する風の影響，第10回風工学シンポジウム論文集，pp.25-36, 1988.
- 7-6) 荒川正一：おろし風を中心とした山越え気流論，気象研究ノート，125号，pp. 115-148, 1975.
- 7-7) 徳島県相生土木工事事務所，徳島大学工学部建設工学科土木設計学研究室，四国建設コンサルタント：道路局部改良工事（環境調査業務等）報告書，1988.
- 7-8) Pearse, J. R., Lindley, D. and Stevenson D. C. ; Wind Flow over Ridges in Simulated Atmospheric Boundary Layers, Bowndary-layer Meteor., 21, pp. 77-92, 1981.
- 7-9) Hinze, J. O. ; Turbulence, 2nd Ed. Chap.3, McGraw-Hill, 1975.

- 7-10) Flaga, A. and Wrana, B. ; Analysis of Empiric Formulae of Power Spectral Densities of Three Wind Velocity Vector Components, Proc. 7th. Int. Conf. on Wind Eng., Aachen, Vol. 1, pp. 11-20, 1987.
- 7-11) 高橋浩一郎 ; 気象雑誌, 22, pp12-19, 1944.
- 7-12) 例えば, 森征洋, 光田寧 ; 鳴門海峡付近の風の特性の実験的研究, 構造物の耐風性に関する第3回シンポジウム論文集, pp. 45-52, 1974.
- 7-13) ESDU ; Wind Speeds and Turbulence, Vol. 1 a, b , ESDU, 1986.
- 7-14) Cook, N. J. ; The Designer's Guide to Wind Loading of Building Structures, Part 1. London, Butterworths, pp.138-162, 1985.
- 7-15) Pearse, J. R., Lindley, D. and Stevenson D. C. ; Wind Flow over Ridges in Simulated Atmospheric Boundary Layers, Boundary-layer Meteor., 21, pp. 77-92, 1981.

第8章

- 8-1) 相馬清二 ; 強風による自動車事故について, 日本風工学会誌, 15, pp. 1-10, 1983.
- 8-2) Utsunomiya, H., Nagao, F. and Hiraoka, T. ; Effects of Topographic Factors on Local Wind Properties, Natural Disaster Science, Vol. 9, No. 2, pp. 77-95 1987.
- 8-3) Cook, N. J., Coulson, B.H. and McKay, W. ; Wind Conditions around the Rock of Gibraltar, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 2, pp. 289-309, 1977/1978.
- 8-4) Scruton, C. ; An Introduction to Wind Effects on Structures, Engineering Design Guides 40, Oxford University Press, 1981.

第9章

- 9-1) 岡内功, 宮田利雄, 他 ; 明石海峡大橋の耐風設計に関する考え方, 第10回風工学シンポジウム論文集, pp. 271-276, 1988.
- 9-2) 樋上 一 ; 斜張橋のRain Vibration, 日本風工学会誌, 27, pp. 17-28, 1986.
- 9-3) 松本勝, 白石成人, 辻井正人, 他 ; 風雨条件下のケーブル振動現象に関する考察,

第10回風工学シンポジウム論文集, pp.133-138, 1988.

- 9-4) 松本勝, 白石成人, 北沢正彦, 他; 傾斜円柱の空力振動特性 — ケーブル Rain Vibration との関連性 —, 第10回風工学シンポジウム論文集, pp.139-144, 1988.
- 9-5) 宮崎正男; 斜張橋ケーブルの空力不安定振動と制振対策, 第10回風工学シンポジウム論文集, pp.145-150, 1988.
- 9-6) 日本道路公団; 関門橋工事報告書, 1977.
- 9-7) 白石成人, 松本勝; 渦励振の発生機構と応答評価, 日本風工学会誌, 20, pp.103-128 1984.
- 9-8) 本州四国連絡橋耐風研究小委員会; 昭和56年度本州四国連絡橋の耐風に関する調査研究報告書, 土木学会, pp.34-40, 1982.
- 9-9) 本州四国連絡橋耐風研究小委員会; 昭和55年度本州四国連絡橋の耐風に関する調査研究報告書, 土木学会, pp.33-40, 1981.
- 9-10) 建設省土木研究所構造研究室; 長大橋梁の耐風性に関する現地観測報告書, 土木研究所資料 第2391号, 1986.
- 9-11) 本州四国連絡橋公団第1建設局鳴門工事事務所; 門崎高架橋上部工(4径間)架設工事, 振動計測及び風観測報告書, 1983.
- 9-12) 本州四国連絡橋耐風研究小委員会; 本州四国連絡橋の耐風に関する調査研究報告書, 土木学会, 1981., 1982.
- 9-13) 岡島厚; 主塔後流域を通過する走行物体に働く非定常空気力, 土木学会第41回年次学術講演会概要集, pp.635-636, 1986.